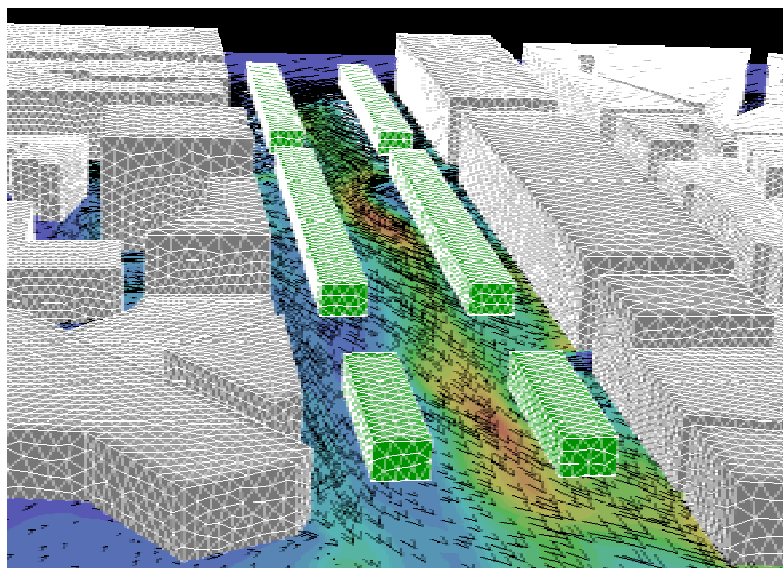




**Jorge Humberto de
Melo Rosa Amorim**

**Modelação do escoamento e da dispersão
de poluentes atmosféricos em áreas urbanas**





Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento
2003

**Jorge Humberto de
Melo Rosa Amorim**

**Modelação do escoamento e da dispersão
de poluentes atmosféricos em áreas urbanas**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Poluição Atmosférica, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda, Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego, Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

vogais

Doutor António Rui de Almeida Figueiredo, Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda, Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Este trabalho estaria seguramente incompleto sem o reconhecimento pelo contributo de todos aqueles que, no decurso da sua concepção, me apoiaram com os seus conhecimentos científicos ou tão só, mas não menos meritória, com a sua amizade incondicional. Todavia, é com pena que reconheço não dominar o suficiente a arte de moldar as palavras para delas tirar todo o ênfase que gostaria de colocar nestas frases simples que dedico àqueles que me acompanharam durante este percurso.

Entre os “Gemaquianos”, como nos apelidamos enquanto elementos do GEMAC (Grupo de Emissões, Modelação e Alterações Climáticas), encontrei um pouco de tudo o que anteriormente referi. Estou certo que tudo teria sido mais difícil e os resultados aquém dos objectivos sem a troca constante de opiniões, naturalmente nem sempre concordantes, e o indisfarçável companheirismo. Não posso deixar de salientar, contudo, o contributo da Margarida Costa com quem, pela proximidade das áreas de trabalho, partilhei muito dos obstáculos com que me debati; à Cristina Carvalho pela sua ajuda em algumas matérias científicas mais problemáticas e na criação do programa “Perfil_Ventos”, e pelo cuidado e tempo que devotou na revisão final do texto; à Anabela Carvalho por ter partilhado a experiência que adquiriu com a sua recente apresentação da dissertação de mestrado; e, finalmente, ao Pedro Santos que me ajudou a superar os problemas inerentes ao *software* e *hardware* e dos quais o investigador actual não poderá jamais dissociar-se, por muito que a tecnologia informática evolua.

À Professora Ana Isabel reconheço o apoio nas diferentes fases que constituíram este trabalho, desde a sua estruturação inicial às sucessivas revisões. O espírito crítico com que pautou a orientação desta Dissertação constituiu um garante da sua qualidade.

Ao Professor Carlos Borrego estou certo de que devo muito mais do que um agradecimento. Reconheço-lhe por inteiro o mérito de reunir as capacidades científicas e gestoras que lhe permitem continuar alimentando a iniciativa que, há cerca de 20 anos, o conduziu a fundar a estrutura que corporaliza este Grupo de Investigação. De outra forma não me teria sido possível dispor dos meios que utilizei, nomeadamente o Laboratório de Túnel de Vento e o modelo FLUENT, fundamentais para a concretização dos objectivos que me propus no âmbito deste trabalho. Uma palavra de apreço igualmente pelo seu contributo na revisão do texto.

agradecimentos (continuação)

À Rita e ao Francisco, mais do que aqui conseguir agradecer por escrito, espero ser capaz de doravante superar a minha ausência, retribuindo e sendo merecedor do carinho e dedicação com que sempre me fizeram acompanhar, munindo-me da força necessária para cumprir o que me propus fazer, tantas vezes à custa da sua própria. Por tudo isto devo à Rita, mais do que a qualquer outra pessoa, tudo o que fiz.

Aos meus pais, de quem recebi uma amizade e compreensão que se mostraram inesgotáveis, e ao meu irmão, cujos conhecimentos da nossa Língua materna enriqueceram ainda um pouco mais este trabalho.

Nos amigos Manela e Zé encontrei o auxílio constante e inestimável, que me cabe agora reconhecer.

Por último, porque esta secção a que intitulei, por obrigatoriedade, de “Agradecimentos” pode significar muito mais do que um reconhecimento pelo contributo palpável de alguém para uma realização pessoal, e sem querer ferir tantos outros que viveram até com mais intensidade do que eu próprio os episódios que fizeram a sua estória, gostaria de fazer das páginas que se seguem, de valor pouco para o tanto que gostaria, a minha dedicatória ao meu avô Leonel, de quem a Vida, a Obra e os Ideais tive como exemplo, estímulo e guia, sentindo-te, por isso, sempre por perto.

resumo

Inserindo-se no contexto actual da avaliação com meios computacionais da qualidade do ar em zonas urbanas, a presente dissertação documenta a aplicação do modelo FLUENT na simulação numérica do escoamento e da dispersão do monóxido de carbono (CO) com origem no tráfego rodoviário. Do conjunto de características mais relevantes deste modelo CFD, indicado para a modelação de escoamentos altamente complexos, é de salientar a capacidade de geração de malhas de cálculo não-estruturadas.

O processo de validação do FLUENT compôs-se de duas vertentes distintas mas complementares. Numa primeira fase foram utilizados como base de comparação os campos de vento e concentração medidos em túnel-de-vento para uma situação urbana idealizada e de geometria simples. Os resultados obtidos evidenciaram um bom comportamento do modelo face à informação obtida experimentalmente. Na etapa seguinte foi avaliado o desempenho do FLUENT por intercomparação com o modelo de escala local VADIS, vocacionado especificamente para o estudo da qualidade do ar. Para tal, foi realizada a simulação da dispersão de CO num domínio de cálculo definido na Baixa Pombalina, em Lisboa, durante um período de 24 horas consecutivas. Com este caso de estudo ficou patente a influência da qualidade dos dados de entrada, em especial meteorológicos e de emissões, sobre a exactidão dos resultados. A geometria simples desta área permitiu desenvolver uma abordagem adequada à utilização do FLUENT neste tipo de estudos.

O FLUENT foi subsequentemente aplicado na simulação da dispersão de CO na Avenida Liberdade, em Lisboa, para um período de 24 horas distinto do anterior. Este domínio de cálculo engloba um conjunto de edifícios, ruas e árvores que conferiram ao problema uma maior complexidade geométrica. O modelo garantiu uma grande flexibilidade na operação de malhagem, permitindo a obtenção da resolução adequada nas zonas mais problemáticas ou de maior interesse do escoamento, sem contudo sobrecarregar o cálculo em termos computacionais. As simulações realizadas revelaram um bom comportamento do modelo face às medições de qualidade do ar realizadas. A consideração das zonas arborizadas como volumes porosos permitiu a identificação do pronunciado efeito destes elementos sobre o escoamento. O trabalho realizado propôs-se contribuir para o desenvolvimento de metodologias adequadas à avaliação da qualidade do ar por intermédio da aplicação de uma ferramenta numérica do tipo CFD. Com o actual avanço tecnológico, os modelos com estas características terão certamente no futuro um papel de grande importância na elaboração de estratégias abrangentes e integradas de gestão ambiental, em particular em zonas urbanas onde um risco potencial para a saúde humana existe.

abstract

Within the current context of air quality evaluation with computational means, the dissertation here presented documents the application of FLUENT model in the numerical simulation of flow and dispersion fields of carbon monoxide (CO) emitted by road traffic. Among the most relevant characteristics of this CFD model, suited for modelling highly complex flows, it should be emphasized the capacity of generating unstructured grids.

Two distinct but complementary aspects constituted FLUENT's validation process. In a first step the velocity and concentration fields measured in a wind tunnel using an idealized and simplified urban geometry were applied. The obtained results showed a good model behaviour in comparison with the experimental data. In the following step FLUENT's performance was evaluated by the intercomparison with the local scale model VADIS, developed specifically for air quality assessment. The CO dispersion simulation was performed on a calculation domain defined at "Baixa Pombalina", in Lisbon, for a 24 hours period. The quality of the input data, especially meteorology and emissions, showed a great influence over the results' accuracy. The simple geometry that characterises this area allowed the development of an adequate approach for FLUENT application in this kind of studies.

FLUENT model was subsequently used on the CO dispersion simulation in "Avenida da Liberdade", also in Lisbon, during a 24 hours period distinct from the previous one. This domain is characterised by the presence of a group of buildings, streets and trees that result on a greater geometrical complexity. The model showed a good flexibility during the meshing procedure, allowing an adequate resolution in the most problematic or relevant zones of the flow, without making the computation too expensive in time. The performed simulations revealed a good performance of the model comparing with the air quality measurements. The introduction of trees as porous volumes allowed the identification of the pronounced effect of these elements over the flow.

The performed work intended to contribute to the development of adequate methodologies for air quality evaluation through the application of CFD models. With the current technological progress, these numerical tools will certainly play on the future an important role in the elaboration of integrated environmental strategies, in particular at urban areas where a potential risk to human health exists.

“... experiment leads and computation follows.”

Suhas Patankar

*“The only happy persons I know are the ones
who are working at something they think it worth.”*

Abraham Maslow

ÍNDICE

Lista de Figuras	iii
Nomenclatura	ix
Lista de Acrónimos	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. CAMADA LIMITE URBANA	3
3. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO FLUENT	7
3.1. Características gerais	7
3.2. Geração da malha de cálculo	9
3.3. Modelação numérica do escoamento e da dispersão	13
3.4. Perfil de vento à entrada do domínio	18
4. VALIDAÇÃO DO MODELO FLUENT	21
4.1. Caso de Estudo 1: Ensaios experimentais em túnel-de-vento	21
4.1.1. Modelação física e numérica: breve análise comparativa	21
4.1.2. Simulação física do escoamento em torno da geometria de estudo	23
4.1.3. Medição do campo de velocidades	27
<i>Anemometria de fio-quente</i>	27
<i>Resultados experimentais</i>	29
4.1.4. Medição do campo de concentrações	30
<i>Deteção por ionização de chama</i>	31
<i>Resultados experimentais</i>	32
4.1.5. Aplicação do FLUENT ao caso de estudo 1	33
<i>Metodologia de simulação numérica</i>	33
<i>Resultados da simulação</i>	34
4.1.6. Intercomparação de resultados experimentais e numéricos	37
4.2. Caso de Estudo 2: Baixa Pombalina	40
4.2.1. Qualidade do ar <i>versus</i> tráfego rodoviário na região de Lisboa	40
4.2.2. Dados de entrada	42

4.2.2.1. Selecção e caracterização do domínio de simulação	43
4.2.2.2. Dados meteorológicos	44
4.2.2.3. Estimativa das emissões do tráfego automóvel	45
4.2.2.4. Dados de qualidade do ar	49
4.2.3. Aplicação do VADIS ao caso de estudo 2	51
4.2.4. Aplicação do FLUENT ao caso de estudo 2	55
4.2.5. Intercomparação dos resultados numéricos	57
5. APLICAÇÃO DO FLUENT À AVENIDA DA LIBERDADE	63
5.1. Caracterização do domínio de simulação	63
5.2. Definição numérica da geometria de cálculo	64
<i>Procedimento para introdução da canópia</i>	66
5.3. Dados meteorológicos	68
5.4. Dados de emissões do tráfego automóvel	69
5.5. Dados de qualidade do ar	70
5.6. Apresentação e análise de resultados	72
6. CONCLUSÕES	81
7. REFERÊNCIAS	85
Endereços na <i>Internet</i>	90
ANEXOS	91
Anexo A - Descrição do modelo numérico FLUENT	93
Anexo B - Validação do modelo FLUENT	95
Caso de Estudo 1: Ensaios experimentais em túnel-de-vento	95
Caso de Estudo 2: Baixa Pombalina	104
Anexo C - Aplicação do FLUENT à Avenida da Liberdade	117

Lista de Figuras

Figura II-1 – Variação do perfil vertical do vento em função da rugosidade do terreno..5	
Figura III-1 – Representação da estrutura do modelo FLUENT..... 8	
Figura III-2 – Comparação dos esquemas de malhagem não-estruturada e estruturada. 10	
Figura III-3 – Visualização da malhagem obtida com e sem a aplicação de uma “Função de Tamanho” 12	
Figura IV-1 – Principais componentes do túnel-de-vento..... 23	
Figura IV-2 – Disposição e dimensões dos blocos e fonte de emissão, de acordo com a configuração de estudo. 24	
Figura IV-3 – Dispositivos empregues na formação da CLA. 25	
Figura IV-4 – Perfil vertical de u , obtido com o anemómetro de fio-quente simples a 10 cm do início da secção-de-ensaio. 26	
Figura IV-5 – Perfil de velocidades linearizado..... 27	
Figura IV-6 – Perfis horizontais de u , obtidos com o fio-quente simples, ao longo do eixo x e ao centro da secção-de-ensaio..... 29	
Figura IV-7 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um corte xz , para $y = 150$ mm..... 32	
Figura IV-8 – Geometria e malhagem do domínio de cálculo do caso de teste 1..... 33	
Figura IV-9 – Campo de velocidade (representado na forma vectorial e em linhas de contorno de igual magnitude), em $m.s^{-1}$, simulado pelo FLUENT para uma altura de 15 mm. 35	
Figura IV-10 – Variação da velocidade ao longo de um eixo horizontal transversal ao escoamento, definido para $z = 15$ mm, e que intersecta o centro dos dois primeiros sólidos..... 36	
Figura IV-11 – Campos de concentrações e de ventos (vectores de velocidade), simulados pelo FLUENT para uma altura de 15 mm..... 37	
Figura IV-12 – Gráfico comparativo dos valores de u na secção-de-ensaio, de acordo com as cinco alturas de medição definidas, obtidos por simulação no FLUENT e medidos no túnel-de-vento. 38	
Figura IV-13 – Campos de concentração experimental e simulado, para um plano horizontal a 15 mm de altura. 39	

Figura IV-14 – Municípios englobados na AML, com diferenciação em AML Norte, Sul e cidade de Lisboa.	40
Figura IV-15 – Gráfico representativo da distribuição do número de deslocações motorizadas diárias na AML por tipo de meio de transporte.	41
Figura IV-16 – Mapa da rede viária principal do concelho de Lisboa e localização do domínio de simulação da baixa Pombalina.	43
Figura IV-17 – Edifícios do domínio de simulação, com indicação das fronteiras de entrada e de saída dos modelos.....	44
Figura IV-18 – Evolução temporal dos valores médios horários de velocidade e direcção relativa do vento, de acordo com as medições realizadas pelo IM na estação meteorológica do Aeroporto da Portela, durante o dia 8 de Julho de 1997.....	45
Figura IV-19 – Localização das fontes de emissão consideradas, das estações de contagem de tráfego e da estação de qualidade do ar.....	46
Figura IV-20 – Evolução temporal dos valores médios horários de fluxo de tráfego e das emissões de CO estimadas pelo TREM para o dia de simulação.....	48
Figura IV-21 – Evolução durante o período de simulação dos valores médios horários das emissões na Rua da Prata, qualidade do ar (concentração de CO) e velocidade do vento.	50
Figura IV-22 – Representação esquemática da estrutura do VADIS e do tipo de informação de entrada e de saída do modelo.....	52
Figura IV-23 – Representação esquemática das malhas de campo de ventos e cartográfica, num plano horizontal de um domínio de cálculo hipotético.	52
Figura IV-24 – Definição de obstáculos e fontes de emissão no VADIS.	53
Figura IV-25 – Malhagem não-estruturada dos obstáculos gerada pelo pré-processador GAMBIT.	55
Figura IV-26 – Campo vectorial de velocidades (em m.s^{-1}) simulado pelo FLUENT para um plano horizontal de altura 3 m, no período das 16 às 17 h.	56
Figura IV-27 – Campo de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$) no período das 16 às 17 h, simulado pelo FLUENT para um plano horizontal de altura 3 m.	56
Figura IV-28 – Perspectiva tridimensional do domínio de simulação e campo de concentrações segundo um plano xz que intersecta a Rua da Prata e pormenor dos vectores de velocidade entre dois edifícios nesse plano.....	57

Figura IV-29 – Evolução temporal das concentrações médias horárias de CO obtidas durante o período em análise por medição na estação de qualidade do ar e por simulação com os modelos VADIS e FLUENT.....	58
Figura IV-30 – Relação entre os valores simulados pelo FLUENT e VADIS com os dados de qualidade do ar medidos e entre os resultados obtidos com cada um dos modelos.....	59
Figura IV-31 – Representação vectorial do campo de ventos e linhas isopletas de concentração de CO simulados com o FLUENT e VADIS para o período das 16 às 17 h.	60
Figura V-1 – Mapa da rede viária principal do concelho de Lisboa e localização do domínio de simulação da Avenida da Liberdade.	63
Figura V-2 – Vista de topo dos edifícios, fontes de emissão e fronteiras de entrada e saída do domínio.....	64
Figura V-3 – Perspectiva tridimensional dos obstáculos presentes no domínio de estudo e respectiva malhagem gerada pelo pré-processador GAMBIT.....	65
Figura V-4 – Representação dos perfis verticais de velocidade obtidos pelo FLUENT em cada um dos eixos representados.	67
Figura V-5 – Evolução temporal dos valores médios horários de velocidade e direcção relativa do vento durante o dia 6 de Março de 2002, adquiridos na estação meteorológica do Geofísico.....	68
Figura V-6 – Localização das fontes de emissão consideradas no domínio de simulação e da estação de qualidade do ar.	69
Figura V-7 – Evolução temporal dos valores médios horários de fluxo de tráfego ($n.^{\circ}$ veículos.h ⁻¹) e das emissões rodoviárias de CO ($kg.m^{-3}.s^{-1}$) estimadas pelo TREM para a Avenida da Liberdade, ao longo do dia de simulação.	70
Figura V-8 – Médias octo-horárias das concentrações de CO medidas em períodos de oito horas consecutivas.....	71
Figura V-9 – Representação num plano horizontal de altura 3 m dos vectores de velocidade (em m.s ⁻¹) simulados pelo FLUENT e correspondentes ao período das 11 às 12 h.....	72
Figura V-10 – Pormenor dos vectores de velocidade (em m.s ⁻¹) numa zona específica do domínio onde há a ocorrência de recirculações do escoamento.....	73

Figura V-11 – Representação num plano horizontal de altura 3 m do campo de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$) simulado pelo FLUENT e correspondente ao período das 11 às 12 h.	74
Figura V-12 – Campos horizontais de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$) e de ventos (m.s^{-1}) simulados pelo FLUENT e correspondentes ao período das 11 às 12 h (plano horizontal de altura 1 m).	75
Figura V-13 – Comparação dos campos verticais de concentração e de velocidade na Avenida da Liberdade obtidos com e sem a presença de árvores (para o período das 11 às 12 h).	76
Figura V-14 – Representação num plano horizontal de altura 3 m do campo de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$) simulado pelo FLUENT sem a introdução de árvores e correspondente ao período das 11 às 12 h.	77
Figura V-15 – Desvios das concentrações horárias de CO estimadas pelo FLUENT relativamente aos valores medidos na estação de qualidade do ar.	78
Figura V-16 – Gráfico comparativo da evolução, durante as 24 horas do período de simulação, dos valores médios horários de velocidade do vento (m.s^{-1}) à entrada do domínio, da emissão de CO ($\text{g.km}^{-1}.\text{s}^{-1}$) estimada pelo TREM para a Avenida da Liberdade, da concentração de CO ($\mu\text{g.m}^{-3}$) medida na estação de qualidade do ar e da concentração ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simulada pelo FLUENT.	79

Lista de Figuras em Anexo

Figura A-1 – Janela de interacção com o utilizador no programa “Perfil_Ventos”.....	93
Figura A-2 – Exemplo de um ficheiro <i>profile</i> gerado pelo programa “Perfil_Ventos” .	93
Figura A-3 – Exemplo de um ficheiro de cálculos intermédios gerado pelo programa “Perfil_Ventos”.	94
Figura B-1 – Perfil adimensional de velocidades obtido com o anemómetro de fio- quente simples a 10 cm do início da secção-de-ensaio.	95
Figura B-2 – Esquema de montagem do equipamento usado na medição do campo de velocidades do escoamento.	96
Figura B-3 – Esquema de montagem do equipamento usado na medição do campo de concentrações do escoamento.....	97
Figura B-4 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um plano yz , para $x = 110$ mm.....	98
Figura B-5 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um plano yz , para $x = 190$ mm.....	98
Figura B-6 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um corte xz , para $y = 120$ mm.....	99
Figura B-7 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um plano xy , para $z = 26$ mm.....	99
Figura B-8 – Campo de velocidade, componente u , segundo o plano $z = 15$ mm.	100
Figura B-9 – Campo de velocidade, componente v , segundo o plano $z = 15$ mm.	100
Figura B-10 – Campo de velocidade, componente w , segundo o plano $z = 15$ mm.....	101
Figura B-11 – Campo de ventos segundo o plano $z = 35$ mm.	101
Figura B-12 – Campo de ventos (em linhas isotáquicas e vectores de velocidade) no plano $z = 15$ mm.	102
Figura B-13 – Pormenor do campo de ventos (em linhas isotáquicas e vectores de velocidade) no plano $z = 15$ mm.....	102
Figura B-14 – Linhas de corrente, coloridas com base na magnitude da velocidade e geradas num eixo horizontal de altura 15 mm localizado à entrada do domínio.	103
Figura B-15 – Gráfico representativo do módulo da diferença dos valores de u simulados (FLUENT) e medidos (fio-quente), para as cinco alturas definidas. ..	103

Figura B-16 – Rede de estações meteorológicas e de medição da qualidade do ar da cidade de Lisboa, com as respectivas imagens das estações de monitorização em contínuo da qualidade do ar situadas na Rua da Prata e Avenida da Liberdade. .	104
Figura B-17 – Vista aérea sobre o domínio da baixa Pombalina e perspectiva tridimensional do domínio de cálculo considerado.	104
Figuras B-18 a B-41 – Campos horizontais (altura 3 m) de concentração de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulados pelo FLUENT para a Baixa Pombalina durante 24 horas.	105
Figura C-1 – Vista aérea sobre o domínio da Avenida da Liberdade e perspectiva sobre o corredor central.	117
Figura C-2 – Perspectiva tridimensional das fontes de emissão existentes no domínio de simulação da Avenida da Liberdade tal como definidas no FLUENT.	117
Figuras C-3 a C-26 – Campos horizontais (altura 3 m) de concentração de CO ($\mu\text{g.m}^{-3}$), simulados pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade durante 24 horas.	118
Figura C-27 – Visualização da perturbação exercida pela presença das árvores sobre o campo vertical de velocidade na Avenida da Liberdade (simulação correspondente ao período das 11 às 12 h).	130

Nomenclatura

Símbolo	Unidades	Significado
A	m	Altura
C	m	Comprimento
C_{HC}	ppm	Concentração de hidrocarboneto
C_1, C_2, C_μ	-	Constantes do modelo $k-\varepsilon$ (1,44; 1,92; 0,09, respectivamente)
C_0, C_1	-	Coefficientes empíricos para o cálculo do termo-fonte num meio poroso
$D_{i,m}$	$m^2.s^{-1}$	Coefficiente de difusão mássica para a espécie i numa mistura
e	C	Carga eléctrica do sistema FID ($1,6 \times 10^{-19}$)
g	$m.s^{-2}$	Aceleração da gravidade ($\sim 9,81$)
G_k	-	Termo de geração de energia cinética turbulenta
J_i	$kg.m^{-2}.s^{-1}$	Fluxo de difusão mássica da espécie i
k	-	Constante de von Karman ($\sim 0,4$)
k	$m^2.s^{-2}$	Energia cinética turbulenta
L	m	Largura
m	-	Número de átomos de carbono da molécula de hidrocarboneto utilizada para medição com o sistema FID
N_a	$moléculas.mol^{-1}$	Número de Avogadro ($6,023 \times 10^{23}$)
p	-	Coefficiente para o cálculo do perfil do vento do tipo potência, dependente da superfície e da estabilidade atmosférica
P	$N.m^{-2}$	Pressão
Q	$cm^3.min^{-1}$	Caudal de amostragem do sistema FID
R_0	$J.mol^{-1}.K^{-1}$	Constante dos gases perfeitos (8,314)
S	-	Termo-fonte
Sc	-	Número de Schmidt
t	-	Índice para turbulência
T	K	Temperatura
u_r	$m.s^{-1}$	Velocidade de referência na equação do perfil do vento do tipo potência
u^*	$m.s^{-1}$	Velocidade tangencial, de atrito ou de corte
u, v, w	$m.s^{-1}$	Componentes da velocidade segundo os eixos x, y e z, respectivamente

x, y, z	m ou mm	Distâncias segundo os eixos x, y e z, respectivamente
Y	-	Fracção mássica
z_0	m	Rugosidade superficial ou altura de rugosidade
z_r	m	Altura de referência
δ	m	Espessura da CLA
ε	$\text{m}^2.\text{s}^{-3}$	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
μ	$\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$	Viscosidade dinâmica (ar $\sim 1,8 \times 10^{-5}$)
ν	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	Viscosidade cinemática (ar $\sim 1,46 \times 10^{-5}$)
ρ	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$	Massa volúmica (ar $\sim 1,29$ a $T = 273 \text{ K}$)
σ_ε	-	Constante do modelo k - ε , n.º de Prandtl turbulento de ε (1,3)
σ_k	-	Constante do modelo k - ε , n.º de Prandtl turbulento de k (1,0)
σ_T	-	Constante do modelo k - ε , n.º de Prandtl turbulento de T (0,7)

Lista de Acrónimos

Designação	Significado
AML	Área Metropolitana de Lisboa
CAD	Desenho Assistido por Computador (acr. inglês)
CFD	Computação da Dinâmica de Fluidos (acr. inglês)
CLA	Camada Limite Atmosférica
CPU	Unidade Central de Processamento (acr. inglês)
DAO-UA	Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro
DNS	Simulação Numérica Directa (acr. inglês)
DRAOT-LVT	Direcção Regional do Ambiente e do Ordenamento do Território de Lisboa e Vale do Tejo
FID	Detector de Ionização de Chama (acr. inglês)
GPL	Gás Propano Liquefeito
IA	Instituto do Ambiente
IM	Instituto de Meteorologia
LAMDA	Laboratório de Aerodinâmica e Modelação da Dispersão na Atmosfera
LDV	Velocimetria de Laser-Doppler (acr. inglês)
LES	Simulação dos Grandes Turbilhões (acr. inglês)
RAM	<i>Random-Access Memory</i> (acr. inglês)
RANS	Aproximação por Média de Reynolds (acr. inglês)
RMQA-L	Rede de Medição da Qualidade do Ar de Lisboa
RSM	Modelo de transporte das tensões de Reynolds
SIG	Sistema de Informação Geográfica

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica antropogénica constitui um fenómeno de características transfronteiriças e cujos efeitos se manifestam à escala mundial. É nas zonas urbanas que, todavia, a degradação da qualidade do ar assume a sua dimensão mais crítica devido à elevada densidade populacional e ao intenso fluxo de tráfego rodoviário, aliadas a condições particulares de escoamento atmosférico.

Análises estatísticas de dados de recenseamento relativos ao período de 1950 a 2000 permitiram verificar que, associada a uma duplicação da população mundial, ocorreu uma quadruplicação da população de tipo urbano, sendo que na União Europeia cerca de 80 % dos cidadãos vivem actualmente em zonas urbanas [WHO, 1999; EC, 2000]. Acompanhando esta tendência, o número de veículos automóveis aumentou segundo um factor de dez durante este período [Mestayer, 1998], com consequentes efeitos sobre a saúde humana associados à presença de concentrações elevadas de óxidos de azoto (NO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV) e partículas (PM).

Os modelos numéricos vocacionados para a simulação do escoamento e dispersão de espécies químicas na atmosfera constituem uma componente essencial na elaboração e execução de planos estratégicos de gestão integrada da qualidade do ar e na adopção de medidas eficazes de controlo da poluição atmosférica, em particular em zonas urbanas.

No decurso da última década, o expressivo aumento das capacidades e desempenhos das plataformas de cálculo (*hardware*), constituiu um forte estímulo à optimização dos códigos numéricos de modelação da dinâmica de fluidos. Actualmente, o recurso a modelos CFD na avaliação das concentrações de poluentes no ar ambiente criou as condições necessárias à obtenção de resultados de elevada fiabilidade, sob as mais diversas condições de entrada. As áreas citadinas, em especial, destacam-se como um dos maiores desafios às capacidades actuais de modelação numérica, devido à complexidade das estruturas tridimensionais existentes. Na secção 2 são abordados

alguns dos aspectos de importância mais premente no estudo da camada limite urbana e, em especial, na simulação da dispersão de poluentes atmosféricos em *street canyons*.

No âmbito da presente dissertação foi aplicado o modelo numérico FLUENT, cujas características de maior relevância neste contexto estão descritas no capítulo 3, para a estimativa dos campos de vento e de concentração do CO com origem nas emissões do tráfego automóvel na Avenida da Liberdade, em Lisboa. Sendo este um *software* com vasta utilização nas mais diversas áreas, a sua aplicação está, contudo, pouco documentada em estudos de qualidade do ar. Este facto justifica *per si* a importância de proceder à sua prévia validação para as condições típicas deste estudo, através da comparação, apresentada no capítulo 4, com dados experimentais obtidos em túnel-de-vento e com os resultados das simulações realizadas com um outro modelo de escala local, para um domínio de cálculo definido na baixa Pombalina, em Lisboa.

O capítulo 5 é integralmente dedicado ao caso de estudo da Avenida da Liberdade, procedendo-se à caracterização do domínio definido, das condições meteorológicas, das emissões e da qualidade do ar durante as 24 horas consecutivas que constituíram o período em análise. Os resultados obtidos foram interpretados atendendo à influência da configuração tridimensional dos edifícios sobre o campo de ventos e ao efeito perturbador da presença de árvores junto à fonte de emissão.

Os distintos níveis de complexidade da configuração dos edifícios existentes nas duas zonas urbanas simuladas permitiram avaliar o estado-da-arte da simulação numérica do escoamento e dispersão de espécies químicas, especialmente no que se refere às potencialidades da geração de malhas de cálculo não-estruturadas em geometrias de maior complexidade.

2. CAMADA LIMITE URBANA

O comportamento da atmosfera em movimento assume, como resposta aos forçamentos com origem na superfície terrestre, características distintas com a altitude que permitem dividir verticalmente a troposfera em duas camadas. A primeira, junto ao solo, e de importância mais directa para os estudos de qualidade do ar à escala local, é a denominada CLA; acima desta, e estendendo-se até à tropopausa, a cerca de 11 km de altitude, encontra-se a camada livre.

A CLA é vulgarmente definida como a fracção da troposfera na qual as forças geradas à superfície, numa escala temporal inferior a uma hora, exercem uma influência directa sobre as suas características e comportamento. Esta camada representa, em média, os primeiros 1000 a 2000 m da atmosfera, mais directamente influenciados pelas trocas de momento, calor e vapor de água com a superfície terrestre. A altura para a qual é possível distinguir a CLA e a camada livre é, como tal, função da magnitude dos fenómenos gerados à superfície. A espessura da CLA apresenta, contudo, variações significativas, de algumas centenas de metros a alguns quilómetros [Stull, 1988].

A turbulência nesta camada atmosférica é gerada no escoamento irregular do fluido ar sobre as superfícies terrestre e aquática da Terra, podendo assumir diversas formas [Borrego, 1994]:

- Movimentos térmicos (*thermals*), ou grandes turbilhões, provocados pelo aquecimento radiativo da superfície;
- Movimentos turbulentos com origem na força de atrito exercida pelo solo sobre o fluido em movimento;
- Esteiras turbulentas formadas no contacto do escoamento com obstáculos naturais (como irregularidades topográficas e vegetação de pequeno ou grande porte) ou artificiais (como edifícios ou veículos).

O escoamento turbulento de um fluido é aparentemente aleatório no espaço e no tempo, caracterizando-se por uma elevada irregularidade, imprevisibilidade e não-linearidade. A ‘cascata de energia’ permite descrever a interacção entre as várias escalas de

turbilhões num escoamento turbulento. De acordo com este processo, ocorre uma transferência de energia dos grandes para os pequenos turbilhões (*eddies*), os quais convertem a energia cinética em térmica por intermédio da acção da dissipação viscosa. A dispersão é uma das propriedades mais relevantes da turbulência, porquanto a capacidade dispersiva da turbulência, dependente das características do escoamento, é várias ordens de grandeza superior à da difusão molecular, que é função do fluido [Lesieur, 1990].

O tipo de circulações atmosféricas na CLA permite ainda distinguir duas sub-camadas internas. A sub-camada superficial (ou de Prandtl) constitui a fracção inferior, representando somente cerca de 10 a 20 % da CLA. Nesta, as velocidades médias são baixas, pelo que as forças de inércia e de Coriolis, que dependem da velocidade, são desprezáveis quando comparadas com as forças tangenciais (viscosas e de Reynolds). O perfil de velocidades é afectado termodinamicamente pelo gradiente vertical de temperaturas com origem no aquecimento diferenciado dos dois meios, atmosfera e solo, e mecanicamente, devido ao efeito da rugosidade do solo sobre o escoamento do ar. Esta sub-camada caracteriza-se, assim, por um pronunciado gradiente vertical de velocidades do vento, mas em que o efeito da espiral de Ekman é desprezável. É também denominada de camada de ‘fluxos constantes’, pelo facto de os fluxos de energia, massa e quantidade de movimento originarem pequenos gradientes. Na fracção restante da CLA, designada de sub-camada exterior ou de Ekman, a inércia é igualmente desprezável e as forças viscosas tornam-se também insignificantes. As tensões de Reynolds, a pressão e a força de Coriolis estão em equilíbrio; com a altitude, os fluxos turbulentos de massa e energia diminuem, enquanto o efeito de Coriolis origina um movimento de rotação da direcção do vento até esta igualar a direcção do escoamento geostrófico da atmosfera livre [Stull, 1988]. A camada livre, por sua vez, é caracterizada pela inexistência de tensões viscosas e de Reynolds, pelo que o movimento do ar é fortemente governado pela rotação da Terra, sendo por isso também designada de camada geostrófica [Borrego, 1994].

Em zonas urbanas, a interacção do escoamento com a alta atmosfera processa-se, essencialmente, através de fluxos verticais dependentes das características térmicas das

superfícies, da intensidade da radiação solar e do próprio aquecimento com origem nas diversas actividades antropogénicas. A rugosidade do terreno, por sua vez, condiciona de forma notória o comportamento aerodinâmico da camada limite em movimento. A canalização do escoamento entre edifícios, e demais estruturas, assume as características típicas de um escoamento em *street canyon*, pelo que a sua complexidade varia com a densidade, distribuição e volumetria dos obstáculos. O efeito da rugosidade no perfil do vento está representado esquematicamente na figura II-1.

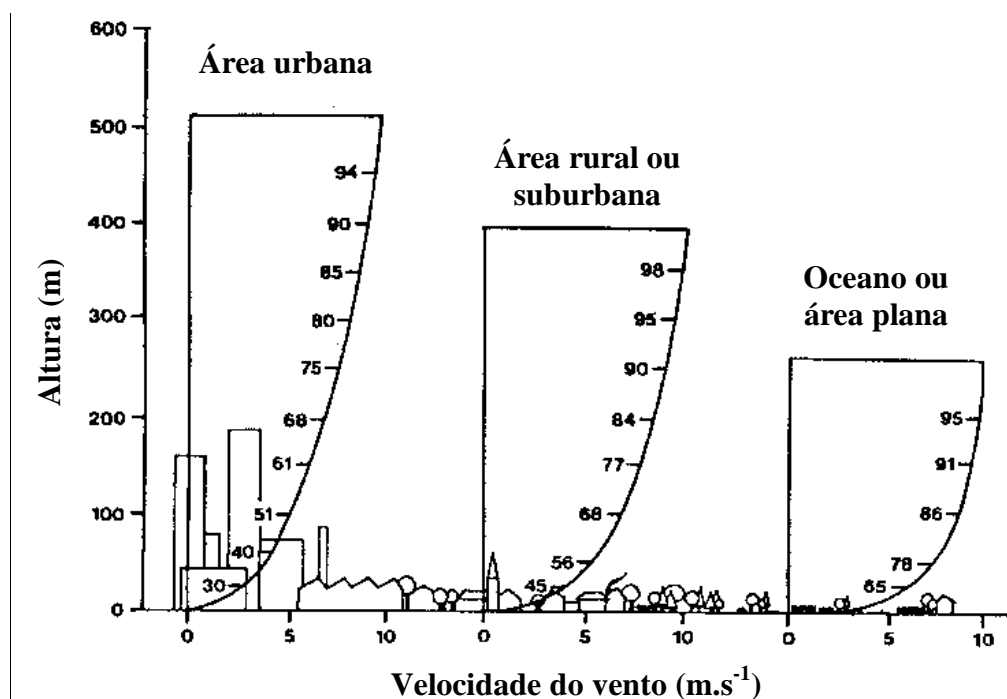


Figura II-1 – Variação do perfil vertical da velocidade do vento em função da rugosidade do terreno [Borrego, 1994].

Como o ar é um fluido viscoso, a sua velocidade sobre uma superfície sólida é nula, aumentando com a altitude até igualar a velocidade do vento geostrófico [Plate, 1995], pelo que a camada limite urbana é caracterizada por intensos gradientes verticais de velocidade, tal como está patente na figura anterior. Devido ao efeito do ciclo de aquecimento e arrefecimento da CLA, que exerce uma forte influência sobre o campo de ventos, a atmosfera raramente é adiabática (neutra). Contudo, considerando-se estritamente a situação da camada limite neutra, ou seja, desprezando a contribuição das forças de flutuação na manutenção ou supressão da energia cinética turbulenta, a

variação da velocidade com a altura na CLA pode ser descrita matematicamente através da lei logarítmica, expressa na equação II-1 sob a sua forma mais usual [Stull, 1988].

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad [\text{II-1}]$$

Esta expressão é função da constante de von Karman (k), cujo valor mais usualmente aceite para a camada limite é de 0,4, da velocidade tangencial (u_*) e, finalmente, da rugosidade superficial (z_0), relacionada com a dimensão dos elementos rugosos. Medições laboratoriais indicam que z_0 representa aproximadamente 1/30 da altura destes elementos. Os valores típicos de z_0 e u_* variam, respectivamente, entre o mínimo de 1×10^{-6} m e $0,16 \text{ m.s}^{-1}$ para superfícies de gelo e o máximo de 0,75 m para z_0 no centro de cidades (não existem valores de u_* medidos nesta situação). O valor de z_0 característico de uma área urbana é de 3 m [Borrego, 1994].

Alargando o âmbito de aplicação também para condições de estabilidade não-neutra, a variação da velocidade na vertical pode ser descrita pela equação do perfil do vento do tipo potência (equação II-2).

$$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}_r} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^p \quad [\text{II-2}]$$

Esta expressão empírica permite o cálculo da velocidade média do vento para uma determinada altura (z) com base em parâmetros definidos para um conjunto de situações típicas [Borrego, 1994].

3. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO FLUENT

No âmbito do presente trabalho foi aplicado o modelo FLUENT a três casos de estudo de características distintas, seleccionados de forma a permitir a avaliação do comportamento do programa para diferentes níveis de exigência computacional na simulação do escoamento de poluentes atmosféricos em ambiente urbano. A principal razão que motivou a sua utilização neste tipo de estudos prendeu-se com a possibilidade de, através da geração de uma malha de cálculo não-estruturada, ser praticável a análise do comportamento do escoamento em torno de estruturas tridimensionais de elevada complexidade.

3.1. Características gerais

Dadas as suas características e capacidades, o FLUENT tem tido em várias áreas uma extensa aplicação como ferramenta CFD, tal como o testemunham os estudos elaborados ao nível das ciências biomédicas ou aeroespaciais, da resolução de diversos problemas de engenharia e de aerodinâmica externa e, em particular, na modelação de processos industriais, desde a simulação do escoamento de fluidos em condutas a situações mais complexas envolvendo, por exemplo, malhas de cálculo dinâmicas (como na simulação do movimento de hélices) ou a mistura de várias fases [Fluent, 2001a]. A sua utilização na simulação do escoamento e dispersão de poluentes atmosféricos em geometrias urbanas está, contudo, insuficientemente documentada na literatura [Lowe *et al.*, 1999; Huber *et al.*, 2001].

Com recurso a este *software* é possível empreender a simulação bidimensional (2D) ou tridimensional (3D) do escoamento laminar ou turbulento, em estado estacionário ou transiente, de fluidos incompressíveis ou compressíveis, newtonianos ou não-newtonianos. Este programa é constituído pelo processador homónimo (versão 6.0.12) e pelo pré-processador GAMBIT (versão 2.0.4), para a construção/importação da geometria e geração da malha de cálculo, e que inclui a ferramenta *TGrid* (para a geração de malhas não-estruturadas híbridas) e um conversor CAD/CAE (para a

importação de superfícies e volumes a partir de programas externos). A figura III-1 esquematiza as principais características de cada um destes módulos e o tipo de informação transferida.

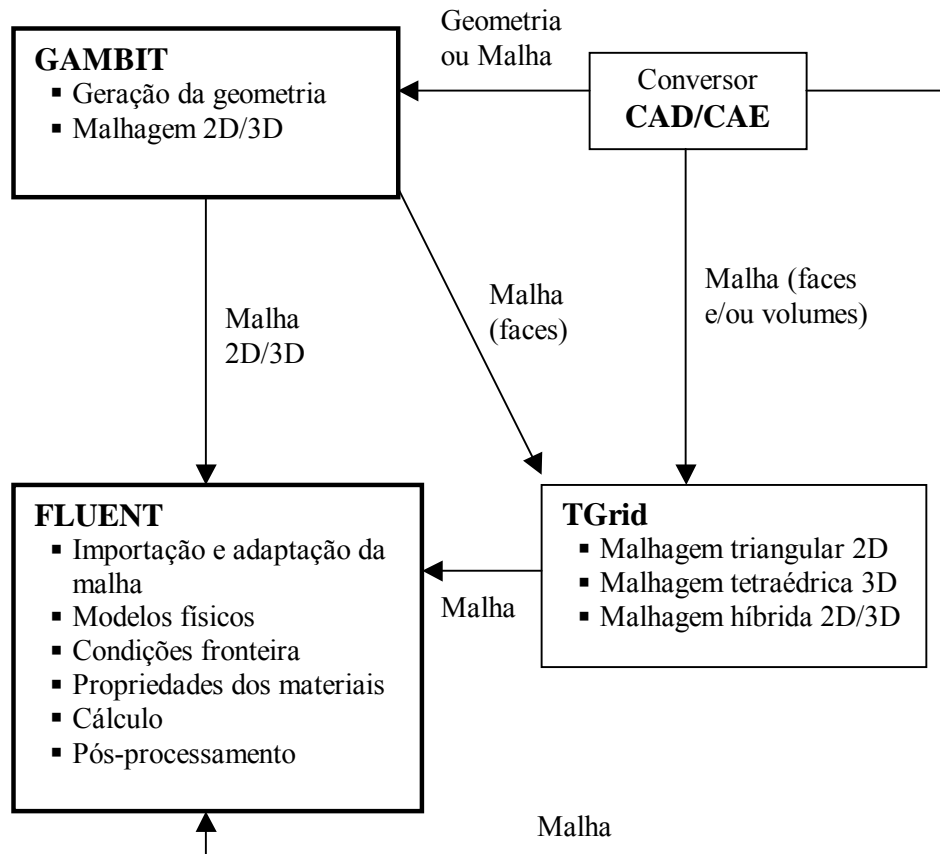


Figura III-1 – Representação da estrutura do modelo FLUENT [Fluent, 2001a].

Toda a informação relativa às características da malha, como as coordenadas e tipo de conexão dos nós e as condições-fronteira definidas, é importada directamente do GAMBIT [Fluent, 2001b]. Este conjunto de dados é posteriormente convertido pelo FLUENT para um ficheiro que reúne todos os parâmetros necessários à realização da simulação. O programa gera um ficheiro que contém os valores relativos ao campo do escoamento em cada elemento da grelha e o histórico de convergência (residuais).

3.2. Geração da malha de cálculo

A resolução numérica do escoamento de fluidos na CLA pressupõe a representação matemática, geralmente por intermédio de equações diferenciais, das leis que governam os fenómenos envolvidos. Neste processo de discretização, a informação contínua contida na solução exacta destas equações é aproximada por um sistema de expressões algébricas definido para as variáveis em causa, num determinado conjunto de localizações discretas no espaço e no tempo. A geometria do domínio de estudo é, de acordo com esta metodologia, dividida num conjunto de células computacionais ou de cálculo que permitem definir a grelha ou malha de computação. O número de células obtido é dependente da dimensão do domínio e da resolução requerida.

Devido ao facto de anteriormente os programas de malhagem do domínio de cálculo recorrerem exclusivamente à utilização de células regulares, o seu âmbito de aplicação restringia-se necessariamente a problemas envolvendo estruturas de geometria simples. Actualmente, os *softwares* utilizados permitem ao utilizador a discretização do domínio em células computacionais irregulares, ou não-estruturadas, garantindo uma maior exactidão nos resultados e uma melhor rendibilização das capacidades de cálculo.

Na simulação da dispersão de poluentes atmosféricos em ambientes urbanos, a geração de malhas estruturadas em geometrias complexas pode revelar-se um processo de grande dificuldade e esforço de resolução; podendo mesmo, dependendo da complexidade envolvida, mostrar-se impossível obter uma solução para o problema com as capacidades computacionais disponíveis. A utilização de malhas não-estruturadas permite a resolução de situações geometricamente complexas que, com o recurso unicamente a elementos do tipo hexaédrico, envolveria necessariamente um número mais elevado de células de cálculo.

No programa FLUENT, a construção das estruturas envolvidas no escoamento e a geração da malha estão a cargo do pré-processador GAMBIT. As estruturas presentes no domínio de cálculo podem ser importadas de um programa externo ou construídas integralmente pelo utilizador, havendo a possibilidade de utilizar sólidos pré-definidos no programa. O pré-processador GAMBIT possibilita a geração de malhas de cálculo

com base em células trilaterais ou quadrilaterais no caso de simulações bidimensionais, e de células tetraédricas, hexaédricas ou piramidais em problemas tridimensionais. Estas células podem ser combinadas de forma a permitir uma maior flexibilização da operação de malhagem, resultando na geração de malhas híbridas [Fluent, 2001a,b].

Na figura III-2 é apresentado o resultado da malhagem não-estruturada e estruturada de um cubo que contém internamente, adjacente a um dos vértices, um outro cubo de menores dimensões.

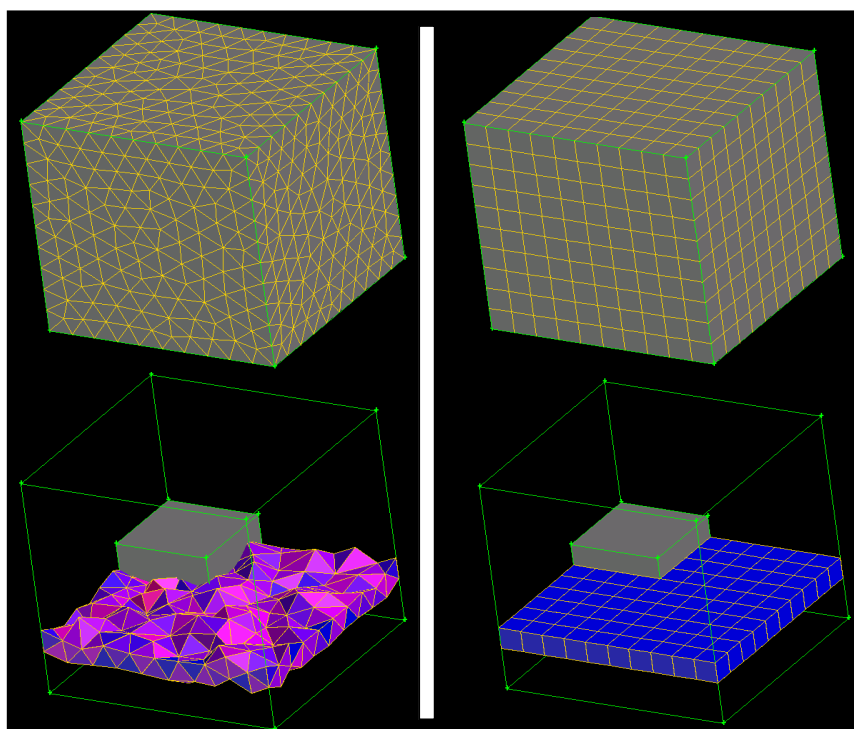


Figura III-2 – Comparação dos esquemas de malhagem não-estruturada (à esquerda) e estruturada (à direita).

Como é possível verificar na figura anterior, imagem da esquerda, o aumento da resolução é assegurado pela adaptação da malha ao objecto interno. Neste exemplo, a utilização do esquema não-estruturado conduziu a um aumento de sete vezes do número de células. Assim, o critério de selecção do tipo de malha a utilizar deve basear-se em dois aspectos fundamentais: a resolução e tipo de células que constituem a malha de cálculo e a difusão numérica associada à malhagem da geometria. A importância de cada um destes factores deve ser avaliada com base no objectivo final da simulação e no

nível de detalhe e exactidão exigido aos resultados. Estes aspectos serão analisados de forma sucinta nos parágrafos seguintes.

Na maioria das situações, uma insuficiente resolução em regiões críticas do domínio de simulação pode alterar de forma significativa as características do escoamento, adulterando a solução do cálculo. Devido à forte interacção entre o escoamento médio e a turbulência, a solução numérica de escoamentos turbulentos tende a demonstrar uma maior dependência relativamente às características da malha do que em laminares. Em fluxos turbulentos, a definição apropriada da resolução da malha é, como tal, um aspecto de extrema importância. Outro exemplo relaciona-se com o movimento de um fluido numa zona confinada por paredes, no qual o escoamento não deve ser computacionalmente representado por um número de células inferior a cinco, sendo que, na maior parte das situações, a exactidão exigida obriga à utilização de um número significativamente superior [Fluent, 2001a]. Assim, em regiões onde as grandezas que representam matematicamente o escoamento apresentam elevados gradientes, a malha deve ser suficientemente “fina” de modo a minimizar a oscilação brusca das variáveis no “movimento” numérico inter-celular. A geração de células não-estruturadas permite um aumento da resolução em zonas críticas, como na proximidade de obstáculos, possibilitando a diminuição dos erros introduzidos com a discretização.

O refinamento da malha pode ser efectuado na etapa de pré-processamento do problema, com a utilização de funções que definem a razão de aumento do tamanho das células a partir de um determinado ponto; assim como no pós-processamento, com a adaptação da malha aos dados estimados. As “Funções de Tamanho” (*Size Functions*), em particular, permitem controlar a dimensão das células de cálculo em regiões específicas do domínio, de forma a obter uma maior resolução na proximidade de um vértice, linha ou face de um determinado objecto. A título exemplificativo, foi criado um domínio constituído unicamente por dois cubos, o qual foi malhado com e sem recurso à definição de uma “Função de Tamanho”. Esta ferramenta permitiu definir a dimensão das células adjacentes à superfície dos cubos e a taxa de crescimento das mesmas com a distância relativamente aos sólidos. Na figura III-3 é apresentada uma

perspectiva frontal da malhagem obtida, sendo nítido na imagem da direita o aumento da resolução na proximidade dos cubos.

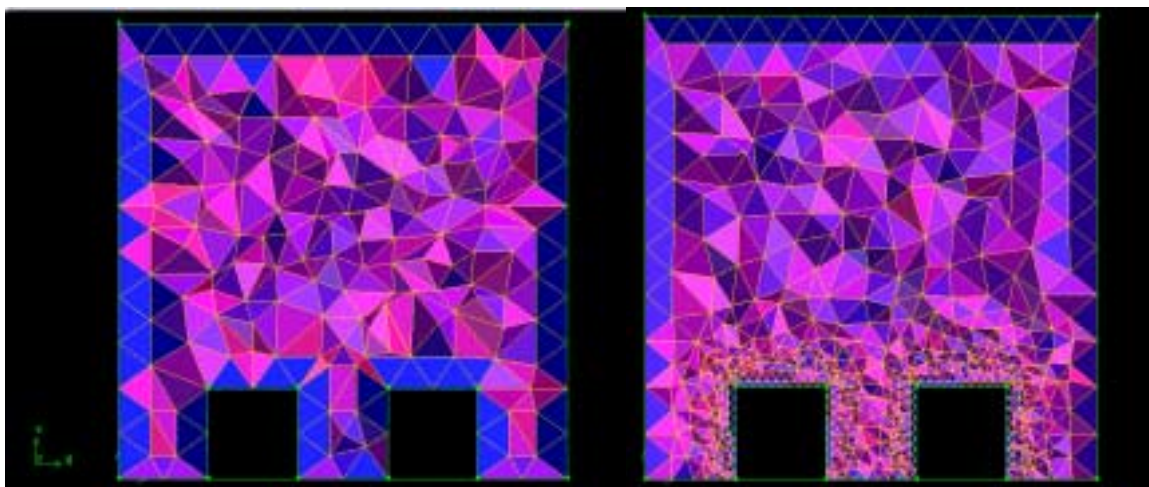


Figura III-3 – Visualização da malhagem obtida com e sem a aplicação (imagem da direita e esquerda, respectivamente) de uma “Função de Tamanho”.

Com o recurso a esta técnica consegue-se um maior rigor na resolução do escoamento em zonas de recirculação, pese embora o aumento do tempo de simulação, que está dependente da dimensão mínima dos elementos e da sua razão de crescimento. No exemplo apresentado, o número de células de cálculo aumentou segundo um factor superior a cinco.

Já na fase de pós-processamento, a malha pode ser refinada com base na solução do problema em zonas do domínio onde se mostrar conveniente, relevante ou necessária a obtenção de uma solução numérica mais detalhada. Esta é uma técnica de grande utilidade, porquanto a densidade das células pode ser definida com base no resultado, permitindo o seu uso mais “económico” e, desta forma, a optimização dos recursos disponíveis.

Um dos problemas relacionados com a utilização de malhas irregulares prende-se com a possibilidade de serem introduzidos erros de truncatura com origem em diferenças significativas no volume de células adjacentes. O FLUENT tem a capacidade de melhorar a homogeneidade das células através do refinamento da malha com base no gradiente de volume entre elementos contíguos. A forma da célula, em particular a sua

simetria, tem igualmente uma influência significativa sobre a exactidão da solução, podendo a assimetria conduzir à instabilidade do processo iterativo e a uma diminuição da exactidão do método numérico.

Outro problema relacionado com a introdução de erros de truncatura na aproximação das equações de escoamento do fluido à sua forma discreta é a difusão numérica. Esta é uma fonte de erro comum em situações de escoamentos multidimensionais, sendo também designada por falsa difusão pelo facto de constituir um fenómeno puramente numérico, mas com efeitos sobre o cálculo análogos aos da difusão real. Qualquer esquema numérico para a resolução do escoamento de fluidos contém uma quantidade finita de difusão numérica; contudo, há um aumento da mesma associado à utilização de malhas não-estruturadas, pelo facto de o escoamento não se encontrar alinhado com as faces das células de cálculo (como acontece com a utilização unicamente de hexaedros). Nesta situação, somente pelo refinamento da resolução da malha é possível diminuir este problema, porquanto o aumento da difusão numérica é inversamente proporcional ao incremento da resolução computacional.

3.3. Modelação numérica do escoamento e da dispersão

No código FLUENT, a representação numérica do escoamento recorre às Equações Gerais da Dinâmica de Fluidos, que traduzem o movimento de uma partícula de ar na atmosfera através das equações de conservação da massa (ou da continuidade), da quantidade de movimento (ou de Navier-Stokes quando referidas a cada uma das componentes da velocidade) e da energia, sendo por isso também designadas de Equações da Lei de Conservação. Na simulação das circulações atmosféricas na camada limite, estas expressões podem ser simplificadas considerando-se o escoamento estacionário de um fluido newtoniano isotrópico e incompressível [Costa, 1995; Lopes, 1993; Martins, 1998].

A DNS possibilita a resolução das equações de Navier-Stokes com dependência do tempo. Contudo, como as flutuações espacio-temporais das quantidades transportadas (massa e momento) no movimento turbulento podem ser de pequena escala e elevada frequência, a simulação directa do escoamento turbulento pode tornar-se inabarcável do ponto de vista computacional. Por esse motivo, a DNS é aplicável somente em escoamentos com baixos valores de Reynolds e em geometrias simples.

Devido às limitações inerentes ao *hardware* e *software*, dificilmente será alcançada, num futuro próximo, a solução exacta e dependente do tempo das equações de Navier-Stokes completas para escoamentos em geometrias complexas com elevados números de Reynolds. De forma a superar este problema, as equações gerais instantâneas (completas) que descrevem o movimento do fluido podem ser manipuladas de modo a remover as flutuações turbulentas de pequena escala, resultando num conjunto de expressões modificadas, de resolução computacional menos dispendiosa. Dois métodos podem ser empregues na transformação das equações de Navier-Stokes: a RANS, que resolve as equações de transporte para o escoamento médio com uma significativa redução do esforço de cálculo, e a LES, que resolve as equações de transporte para os grandes *eddies* e simula os de menor escala.

Contudo, estes métodos introduzem termos adicionais nas equações gerais que necessitam de ser simulados, obrigando à utilização de modelos de turbulência que garantam um número suficiente de equações para todas as variáveis e, desta forma, o fecho do problema. Existem actualmente vários códigos numéricos de modelação da turbulência gerada pelo movimento de um fluido. Para além de um modelo baseado na LES, o *software* FLUENT disponibiliza um conjunto muito completo de modelos de turbulência que aplicam a RANS: *Spalart-Allmaras*, $k-\epsilon$, $k-\omega$ e RSM.

No que se refere aos modelos de turbulência com base na RANS, as tensões de Reynolds nas equações de Navier-Stokes necessitam de ser convenientemente simuladas. Por esta razão, esta classe de modelos divide-se noutros dois tipos: modelos com base na aproximação de Boussinesq e modelos de transporte das tensões de Reynolds (RSM, no acrónimo inglês).

A primeira opção é empregue nos modelos de Spalart-Allmaras, $k-\varepsilon$ e $k-\omega$, sendo aquela a que se recorre com maior frequência. Esta aproximação baseia-se no facto de, quer a turbulência quer a viscosidade, retirarem de forma semelhante a energia do escoamento médio e a transferirem para escalas menores. No caso da turbulência, a dissipação de energia processa-se, de acordo com a já referida ‘cascata de energia’, por intermédio da acção dos pequenos turbilhões. Tratando-se da viscosidade, a dissipação ocorre devido aos movimentos moleculares. Segundo esta aproximação, as tensões de Reynolds são relacionadas com os gradientes da velocidade média segundo um factor de proporcionalidade designado por viscosidade turbulenta, μ_t , que é propriedade do escoamento (e não do fluido), e cuja denominação deriva do coeficiente da equação que traduz a lei de Newton para um escoamento laminar. Também em termos de formulação as tensões de Reynolds aparecem com uma forma semelhante às tensões viscosas.

Alternativamente, os modelos RSM permitem a resolução das equações de transporte para cada um dos termos no tensor das tensões de Reynolds, obrigando à definição de uma equação adicional, normalmente para ε . Obtêm-se assim cinco equações de transporte adicionais em escoamentos bidimensionais e sete em escoamentos tridimensionais.

A selecção do modelo de turbulência mais adequado para a resolução de um determinado problema decorre, fundamentalmente, do conhecimento das capacidades e limitações inerentes a cada um, da consideração dos processos físicos envolvidos no escoamento, da avaliação da exactidão requerida, dos meios físicos de cálculo disponíveis (*hardware*) e do tempo de simulação necessário. Na generalidade das situações, os modelos baseados na aproximação de Boussinesq apresentam um bom desempenho, com um custo computacional relativamente baixo associado à computação da viscosidade turbulenta, μ_t , pelo que a despesa computacional adicional representada pela utilização do modelo RSM pode não ser justificada. A principal desvantagem dos modelos baseados na aproximação de Boussinesq reside no facto de assumirem que μ_t representa uma quantidade escalar isotrópica; por outro lado, o modelo RSM conduz a resultados de melhor qualidade em problemas em que a anisotropia da turbulência exerce um efeito dominante sobre o escoamento médio.

No caso do modelo de Spalart-Allmaras, somente uma equação adicional de transporte (que representa μ_t) é resolvida. Por esta razão, em termos computacionais este é o menos dispendioso dos modelos de turbulência disponíveis. No caso dos modelos k - ε e k - ω , duas equações adicionais de transporte (para a energia cinética turbulenta, k , e para a taxa de dissipação da turbulência, ε , ou para a taxa de dissipação específica, ω) são resolvidas e μ_t é calculada como função de k e ε . Estes modelos requerem, por isso, um maior esforço computacional do que o modelo Spalart-Allmaras. O RSM envolve, comparativamente com todos os outros, um maior dispêndio de memória e de tempo de processamento devido ao maior número de equações de transporte resolvidas para as tensões de Reynolds, conduzindo, em média, a um acréscimo de 50 a 60 % em tempo de CPU por iteração e de 15 a 20 % de memória [Fluent, 2001a].

Avaliadas as limitações e potencialidades de cada modelo, foi seleccionado o k - ε como aquele que representaria, para as características da situação em estudo, um melhor compromisso entre exactidão e recursos informáticos. Por outro lado, a validação do FLUENT foi realizada por intercomparação com os resultados do modelo VADIS (ver sub-capítulo 4.2), que emprega este método numérico para a resolução da turbulência.

Este modelo semi-empírico foi, desde a sua concepção em 1972 por Launder e Spalding [Launder *et al.*, 1972], submetido a desenvolvimentos ao nível do código numérico que vieram colmatar algumas limitações da versão original, nomeadamente no que se refere ao método de cálculo da viscosidade turbulenta e aos termos de geração e destruição na equação de ε . O FLUENT disponibiliza igualmente duas das versões mais recentes; contudo, nas aplicações realizadas no âmbito do presente trabalho foi utilizada unicamente a versão inicial.

As equações de transporte de k e ε são resolvidas através da aplicação de um fecho de turbulência de primeira ordem, assumindo as condições de um escoamento totalmente turbulento e desprezando os efeitos da viscosidade molecular. A partir das equações de Navier-Stokes é possível deduzir as equações que constituem a formulação teórica de base deste modelo, aqui expressas de acordo com a notação tensorial de Einstein [Andrade, 1988; Fluent, 2001a; Martins, 1998]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + \beta g_i \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial z} - \varepsilon \quad [\text{III-1}] \\ u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \left(C_1 \frac{G_k}{\varepsilon} - C_2 \right) \frac{\varepsilon^2}{k} \quad [\text{III-2}] \end{array} \right.$$

$$\text{com,} \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad [\text{III-3}]$$

Os valores adoptados no FLUENT para as constantes do modelo de turbulência k - ε são, por defeito, os seguintes, podendo ser alterados pelo utilizador:

$$C_1 = 1,44; C_2 = 1,92; C_\mu = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3; \sigma_T = 0,7$$

Para a modelação da dispersão no FLUENT, a evolução da velocidade e da concentração é descrita pelas equações de Navier-Stokes e pela equação de conservação da concentração segundo uma aproximação Euleriana, em que propriedades como a velocidade do fluido e a concentração são definidas num referencial fixo para um determinado instante. A fracção mássica de uma determinada espécie química (de índice i) é estimada pelo modelo através da resolução de uma equação de conservação de convecção-difusão (equação III-4), simplificada considerando unicamente espécies passivas.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_i \quad [\text{III-4}]$$

Em escoamentos turbulentos, a difusão mássica é calculada através da aplicação da equação III-5.

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad [\text{III-5}]$$

3.4. Perfil de vento à entrada do domínio

A inicialização meteorológica do modelo foi realizada através da introdução de um perfil vertical de velocidades nas fronteiras de entrada do domínio de cálculo. Para tal, foi criado para cada simulação horária um ficheiro *profile* com informação acerca da velocidade e direcção do vento. Este tipo de ficheiro permite a definição das características do escoamento em regiões-fronteira, tendo por base dados obtidos numérica ou experimentalmente.

Este *profile* é constituído por um conjunto de n pontos do tipo (x_i, y_i, θ_i) , em que x_i e y_i representam, respectivamente, a posição do ponto de índice i nos eixos x e y (sendo que $1 \leq i \leq n$) e θ_i a(s) quantidade(s) que se pretende(m) representar. A este conjunto de dados pontuais é aplicada uma interpolação de ordem zero, segundo a qual para cada célula da face que constitui a fronteira é usado o valor do perfil mais próximo, pelo que o perfil criado é tanto mais próximo da realidade quanto maior for a densidade de pontos.

Atendendo ao número de simulações horárias a realizar, a operação de cálculo dos valores de velocidade e direcção para diferentes alturas, tendo por base a aplicação da lei de potência (para meios urbanos, de acordo com o referido na secção 2) às medições realizadas para a altura de referência, e a sua representação no formato específico do ficheiro *profile*, revelou-se uma tarefa muito demorada. Como forma de simplificar este procedimento, foi desenvolvido no âmbito deste trabalho um programa em linguagem Fortran (versão “Fortran 90”), denominado “Perfil_Ventos”.

A geração deste ficheiro meteorológico compreende as seguintes operações:

- Cálculo da direcção relativa do vento, corrigida com base na orientação do domínio (ver secções 4.2.2.2 e 5.3);
- Cálculo, com base no perfil de potência, da velocidade do vento em cada valor de z à entrada do domínio;
- Cálculo das componentes horizontais da velocidade para cada valor de z , segundo os eixos x e y , com base na velocidade e direcção do vento;

- Construção do ficheiro *profile* (*.prof) de entrada no modelo FLUENT, com os valores de u e v para o conjunto de pontos de coordenadas (x, y, z) que define o plano de entrada.

Através de uma janela de interacção com o utilizador é fornecida a informação de entrada necessária, como o nome do ficheiro e dos valores da altura, largura e orientação do domínio, da velocidade e direcção do vento na fronteira de entrada, de p e da altura de referência (ver figura A-1 em anexo). O programa gera um ficheiro do tipo *profile* (ver figura A-2 em anexo) e um que permite a verificação da informação introduzida e a visualização dos valores de velocidade calculados para cada ponto z (ver figura A-3 em anexo).

Este programa mostrou-se muito útil na preparação de simulações com diferentes condições meteorológicas, diminuindo significativamente o esforço e o tempo despendidos na inicialização do FLUENT.

4. VALIDAÇÃO DO MODELO FLUENT

O processo de avaliação do desempenho do modelo FLUENT no estudo da qualidade do ar constou, no presente trabalho, de duas componentes que se distinguem nos fundamentos e metodologia, mas cuja aplicação se complementa:

- Intercomparação dos resultados do FLUENT com dados experimentais adquiridos em túnel-de-vento para uma situação urbana idealizada e de geometria simples (caso de estudo 1, abordado no sub-capítulo 4.1.);
- Intercomparação dos valores estimados pelo FLUENT com os de um modelo numérico de escala local, para uma situação de tráfego e meteorológica real e num domínio de cálculo definido para a baixa Pombalina, em Lisboa (caso de estudo 2, apresentado no sub-capítulo 4.2.).

4.1. Caso de Estudo 1: Ensaios experimentais em túnel-de-vento

O caso de estudo 1 foi concebido tendo como objectivo uma avaliação preliminar, para uma situação hipotética e simples, do comportamento do FLUENT nas condições de simulação de um escoamento urbano. Para tal, foram utilizados como base de intercomparação os resultados experimentais decorrentes da medição em túnel-de-vento dos campos de velocidade e concentração em torno de três sólidos de geometria regular, tendo como trabalho de base a investigação desenvolvida por Borrego *et al.* (2000a,c) nesta área.

4.1.1. Modelação física e numérica: breve análise comparativa

Não constitui objectivo do presente trabalho a análise pormenorizada das limitações inerentes às técnicas e equipamento de medição utilizados em túnel-de-vento e ao cálculo numérico do escoamento. Não obstante, mostra-se relevante realçar alguns

aspectos fundamentais que permitem, mais do que valorizar uma das metodologias relativamente à outra, apresentá-las como complementares.

Como referido anteriormente, o recurso a suportes e métodos computacionais mais evoluídos e potentes tem possibilitado o aumento da precisão e rapidez de cálculo na modelação da dinâmica de fluidos. Os meios informáticos actuais não detêm, todavia, a capacidade de resposta que seria desejável para as exigências colocadas em termos de resolução da malha, tendo em vista a representação exacta, e em tempo útil, dos fenómenos envolvidos no escoamento [Schatzmann *et al.*, 2001]. Assim, a investigação nesta área tem tido como pilar fundamental a realização de ensaios experimentais em túnel-de-vento.

Contudo, pelo facto de envolver a utilização de equipamento de visualização e medição de custo avultado, a simulação física em túnel-de-vento é comumente associada ao elevado investimento monetário, assim como ao tempo despendido na preparação e realização dos ensaios. Por outro lado, há a considerar os problemas associados com os efeitos de escala, com a simulação de situações de estabilidade atmosférica não-neutra e com condições de direcção do vento variável [Martins, 1998]. Comparativamente com a realização de ensaios à escala real, a experimentação em túnel-de-vento permite um maior controlo das condições em que a experiência decorre, o que fornece uma maior garantia sobre a reprodutibilidade dos resultados e possibilita a análise dos parâmetros face à variação dos valores de entrada.

Permitindo a aquisição de dados experimentais para a validação dos resultados das simulações numéricas, a modelação física tem assumido um papel fundamental no desenvolvimento e optimização dos modelos de qualidade do ar [Leitl e Schatzmann, 2001]. Assim, é correcto afirmar que a inovação computacional depende dos métodos experimentais de análise, na medida em que resulta da realização de ensaios em túnel-de-vento a obtenção da informação necessária à representação numérica do comportamento dinâmico de um fluido [Patankar, 1980].

Em suma, no complexo processo de investigação científica, longe de alguma vez terminado, as abordagens computacional e experimental devem ser consideradas de

forma integrada e complementar, em especial no processo de gestão da qualidade do ar, pesando as respectivas necessidades e deficiências e atribuindo a importância devida a cada um dos aspectos, mais ou menos positivos, inerentes a cada uma das metodologias.

4.1.2. Simulação física do escoamento em torno da geometria de estudo

De acordo com o referido no capítulo 2, como resultado da conjugação de múltiplos efeitos aerodinâmicos induzidos pela presença de obstáculos tridimensionais, o escoamento atmosférico urbano caracteriza-se por uma elevada complexidade, representando “ainda” um desafio para as capacidades actuais de simulação numérica e também física.

No âmbito do presente trabalho, os ensaios experimentais de simulação das condições de escoamento e dispersão de poluentes atmosféricos num meio urbano idealizado decorreram nas instalações do LAMDA, no túnel-de-vento da figura IV-1.

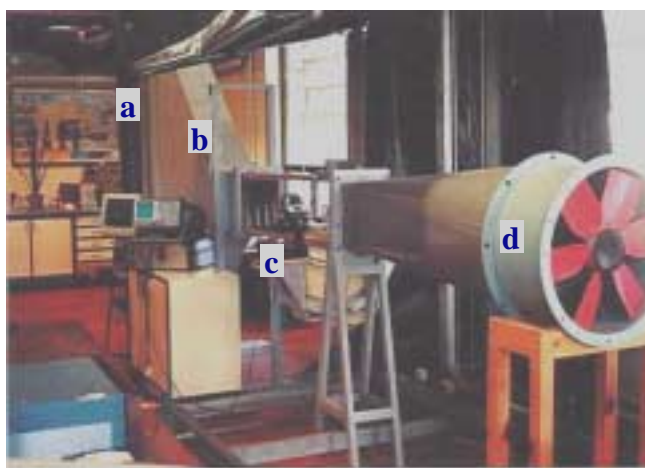


Figura IV-1 – Principais componentes do túnel-de-vento: câmara-de-estabilização (a), convergente (b), secção-de-ensaio (c) e ventilador (d).

As reduzidas dimensões da secção-de-ensaio, com $1,30 \times 0,25 \times 0,30 \text{ m}^3$ ($C \times L \times A$), tornam este equipamento adequado fundamentalmente à realização de estudos relacionados com a geração de turbulência [Costa, 1996; Martins, 1998]. Este túnel-de-

-vento tem um comprimento total de 6 metros, caracterizando-se pelo funcionamento em circuito aberto e por sucção.

A configuração de estudo compunha-se de 3 paralelepípedos, com dimensões de $90 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, dispostos de acordo com o representado na figura IV-2. A dimensão dos blocos foi definida de modo a diminuir os efeitos de blocagem. A emissão do gás traçador, necessário à medição com o detector de ionização de chama (sistema FID, ver ponto 4.1.4.), foi efectuada a uma distância de 40 mm a montante dos dois primeiros obstáculos e a uma altura de 15 mm, de acordo com a mesma figura.

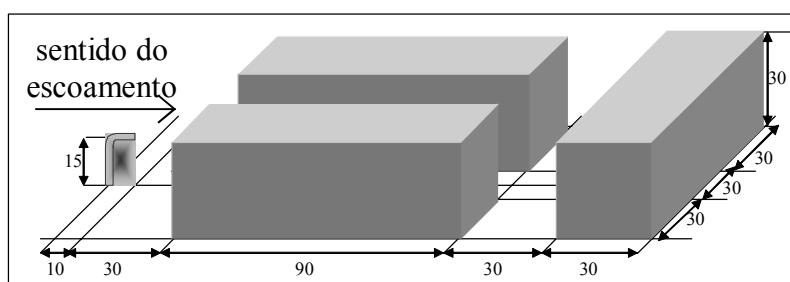


Figura IV-2 – Disposição e dimensões (em milímetros) dos blocos e fonte de emissão, de acordo com a configuração de estudo.

Pela sua simplicidade, esta configuração permitiu a análise de alguns dos fenómenos que, à escala real, determinam a dispersão dos poluentes em geometrias mais complexas, em particular em situações de escoamento em *street canyons*. De modo a garantir a semelhança do número de Reynolds, que relaciona as forças inerciais e as viscosas, foi considerado um valor crítico de 10^4 [decorrente da análise realizada por Snyder (1981)], a partir do qual as características do escoamento são independentes deste parâmetro adimensional para escoamentos em torno de sólidos rectangulares, como edifícios. Nos trabalhos de (1996) são analisados os diferentes parâmetros de semelhança de maior pertinência na simulação em túnel-de-vento de escoamentos gasosos turbulentos na camada limite.

Idealmente, a simulação física do escoamento e dispersão urbanos deveria atender aos efeitos de origem térmica, contudo, dada a inexistência dos meios técnicos necessários ao desenvolvimento de uma camada com estratificação térmica, as medições experimentais realizadas decorreram sob estabilidade neutra. Nestas condições, a

velocidade média e a turbulência assumem-se como os parâmetros de controlo mais relevantes, o que permite simplificar a representação da estrutura vertical da velocidade e turbulência.

Em ensaios em túnel-de-vento é fundamental que se estabeleça correctamente o perfil de velocidades na secção-de-ensaio, de modo a que a intensidade e a escala da turbulência sejam comparáveis às da atmosfera [Irwin, 1981]. A impossibilidade de desenvolver uma camada limite completamente desenvolvida, tal como acontece na atmosfera real, é tanto mais difícil quanto menores forem as dimensões da secção-de-ensaio, definindo-se um comprimento mínimo de 5 a 10 vezes a altura desta camada [Costa, 1996]. Esta dificuldade pode ser contornada com a utilização de dispositivos que permitem a obtenção de um perfil semelhante ao de uma CLA urbana [Snyder, 1981]. Como tal, um conjunto de espiras triangulares (ou *spikes*) colocadas à entrada do túnel permitiu a geração controlada de vórtices e, desta forma, a formação de gradientes de velocidade e turbulência próximos daqueles que se pretendiam recriar na secção-de-ensaio. Imediatamente após as espiras, um conjunto de 25 peças de “Lego”, dispostas de acordo com o representado na figura IV-3, garantiu a rugosidade pretendida.

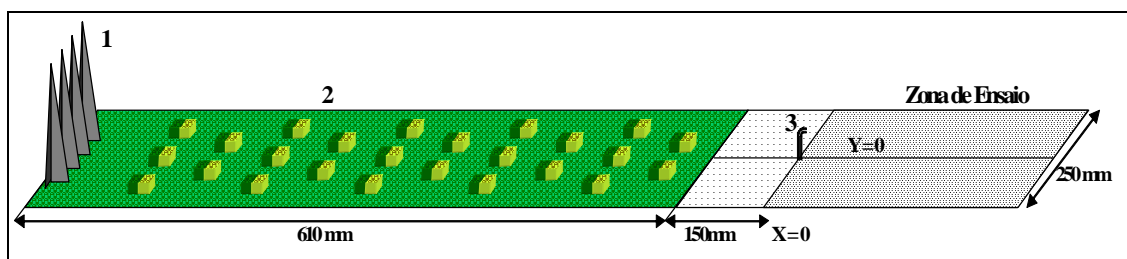


Figura IV-3 – Dispositivos empregues na formação da CLA.

Onde,

- 1- Espiras triangulares (22 mm × 22 mm × 140 mm);
- 2- Placa (610 mm × 250 mm × 3 mm) e blocos (31 mm × 30 mm × 11 mm) “Lego”;
- 3- Fonte emissora do gás traçador para medição das concentrações pelo FID.

O número e disposição das peças “Lego” a utilizar foram determinados experimentalmente, tendo por objectivo encontrar a rugosidade necessária à geração do perfil de velocidades pretendido. As dimensões das espiras e das rugosidades estão de acordo com as expressões empíricas formuladas por Irwin (1981) para a simulação em

túnel-de-vento da estrutura vertical de velocidades característica de uma atmosfera urbana.

No gráfico da figura IV-4 são apresentadas as medições da componente u da velocidade, realizadas com o anemómetro de fio-quente simples ao longo de um eixo vertical, centrado na secção-de-ensaio, e a 10 cm do início da mesma. A velocidade de medição imposta no túnel-de-vento foi de 5 m.s^{-1} , sendo este um valor típico para escoamentos turbulentos em meios urbanos.

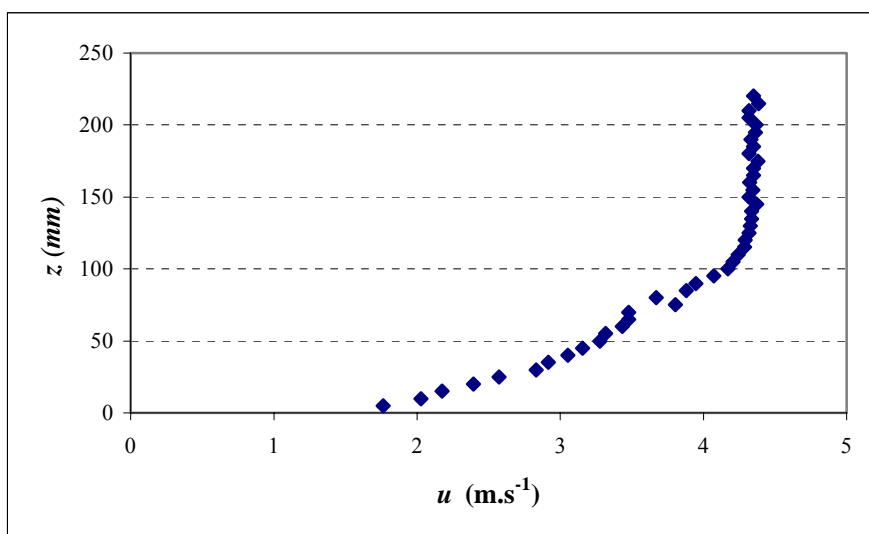


Figura IV-4 – Perfil vertical de u , obtido com o anemómetro de fio-quente simples a 10 cm do início da secção-de-ensaio.

A espessura da camada limite (δ) (expressa pela altura de referência, z_r , nas equações II-2 e IV-1) representa, em termos práticos, a altura a partir da qual a componente u da velocidade iguala a velocidade do escoamento livre [Borrego *et al.*, 2000c]. A partir do gráfico anterior foi possível a obtenção de um valor para δ igual a 145 mm.

O perfil de velocidades pode ser adimensionalizado representando graficamente a variação de u/u_r (em que u_r é a velocidade em z_r) com z/z_r (ver figura B-1, em anexo). O valor de p pode ser determinado mediante a linearização da equação do perfil do vento do tipo potência (equação II-2).

$$\ln(z/z_r) = \frac{1}{p} \cdot \ln(u/u_r) \quad [\text{IV-1}]$$

Representando graficamente os valores de $\ln(z/z_r)$ em função de $\ln(u/u_r)$ obteve-se a curva da figura IV-5.

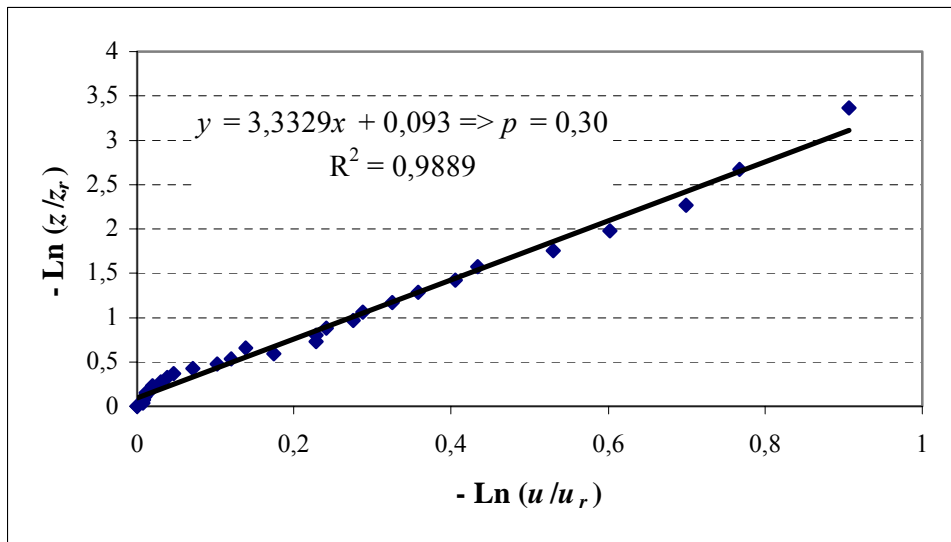


Figura IV-5 – Perfil de velocidades linearizado.

Com a linearização da curva anterior foi obtido um valor de p de 0,30, que corresponde a uma situação de estabilidade neutra numa zona urbana com as características da do presente estudo.

4.1.3. Medição do campo de velocidades

A influência do conjunto de edifícios sobre o campo de velocidades do escoamento foi avaliada recorrendo à medição por anemometria de fio-quente.

Anemometria de fio-quente

A medição da velocidade por anemometria de fio-quente a temperatura constante é realizada através da quantificação do fluxo de calor entre um fio aquecido electricamente e o fluido em contacto com o sensor. A temperatura da sonda é mantida

constante fazendo variar a corrente eléctrica fornecida. Com a utilização de equipamento electrónico específico, o sinal eléctrico obtido é convertido nas componentes (uma, duas ou três, consoante o tipo de sensor utilizado) da velocidade instantânea no ponto de medição [Bruun, 1995; Costa, 1996].

Como em qualquer procedimento experimental, existem necessariamente limitações inerentes à metodologia e ao equipamento utilizados que deverão ser consideradas de modo a que a sua eventual influência sobre os resultados seja convenientemente avaliada. Na anemometria de fio-quente são de referir, em particular, as perturbações exercidas no escoamento pela colocação do suporte e sensor, que constituem elementos intrusivos. Outro aspecto importante prende-se com o facto de, ainda que os sensores utilizados permitam a medição da velocidade até frequências de 50 kHz (valores que possibilitam a análise da componente turbulenta do escoamento) em situações de escoamento muito perturbado, como em zonas de recirculação, esta técnica não garantir a determinação rigorosa da direcção do escoamento, podendo dessa forma “mascarar” os resultados obtidos [Borrego, 1980; Martins, 1998]. Idealmente, os ensaios realizados deveriam ser complementados com a utilização de sensores constituídos por três filamentos cruzados, ou através da medição com um sistema LDV de três componentes, que permitiria definir os campos tridimensionais da velocidade sem intrusão de um elemento perturbador do escoamento.

Como a resposta da sonda é altamente sensível às condições de pressão e temperatura e à deposição de partículas de pó sobre a sua superfície, mostra-se necessário proceder à calibração do equipamento antes de cada medição. Neste processo é construída uma curva que representa a variação do sinal eléctrico fornecido pelo sensor, em função da variação da velocidade imposta por um equipamento de características específicas para esse fim.

Por intermédio da utilização de um sensor de fio-quente simples do tipo transversal procedeu-se à medição da componente u da velocidade. O esquema de montagem do equipamento utilizado na medição do campo de velocidades está representado na figura B-2 (em anexo). De forma a manter as condições impostas na medição da concentração, foi igualmente introduzida a fonte de emissão de gás traçador utilizada com o sistema

FID, contabilizando-se assim as (pequenas) perturbações por esta induzidas sobre o escoamento.

A utilização de um sistema de posicionamento (ver também figura B-2, em anexo) de duas componentes (eixos x e y), controlado pelo utilizador via interface gráfica, permitiu a automatização do movimento da sonda e da aquisição de velocidades. A medição de u foi realizada para cinco alturas distintas: 15, 35, 50, 70 e 130 mm.

Resultados experimentais

O gráfico da figura IV-6 apresenta os valores de u adquiridos ao longo do eixo x e ao centro da secção-de-ensaio, para as diferentes alturas de medição.

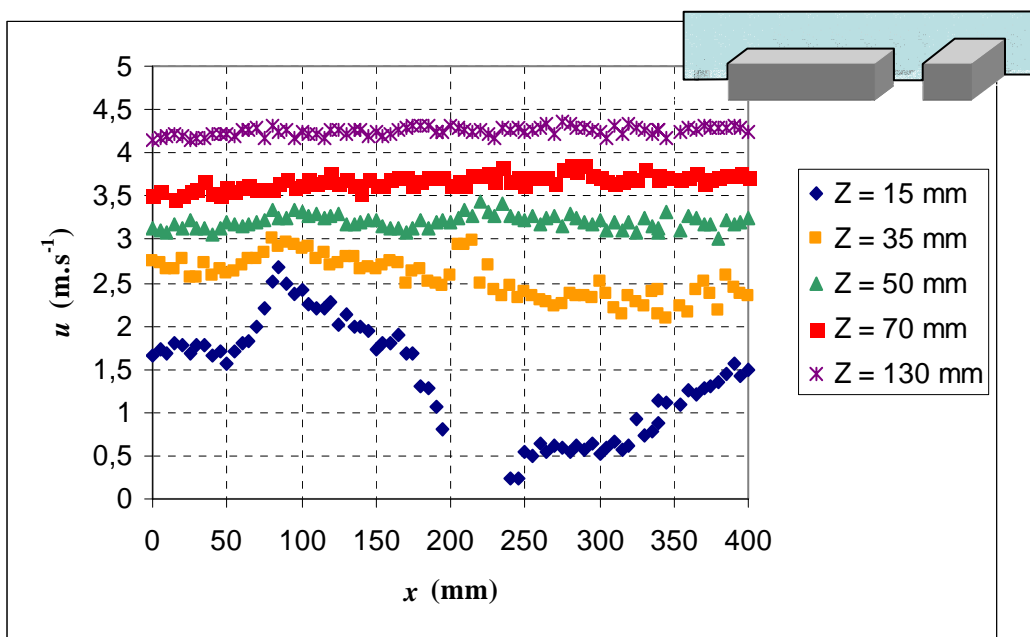


Figura IV-6 – Perfis horizontais de u , obtidos com o fio-quente simples, ao longo do eixo x e ao centro da secção-de-ensaio (a inexistência de dados de velocidade para as posições 200 a 230 mm prende-se com o facto de as medições a 15 mm intersectarem, à meia altura, o terceiro edifício).

A análise deste gráfico permite tirar algumas ilações importantes quanto ao comportamento do escoamento perante a perturbação exercida pela presença dos três obstáculos. A primeira conclusão resulta da interpretação dos perfis de velocidade medidos. Assim, é notório o aumento de u com z , o que está de acordo com a condição de não-escorregamento e com o perfil de camada-limite estabelecido. Por outro lado, há

a distinguir três fases no escoamento, e que serão seguidamente analisadas: a aproximação do fluido aos dois primeiros blocos, o forçamento do escoamento entre estes e o choque contra o terceiro e, finalmente, o deslocamento na esteira deste.

Com a súbita diminuição da secção transversal ao escoamento à entrada do *canyon* ocorre um aumento da velocidade, registado para os três primeiros níveis de medição, e em particular para z igual a 15 mm (no qual a variação é de $1,2 \text{ m.s}^{-1}$, equivalente em termos percentuais a um acréscimo sobre a velocidade inicial de 80 %). Também para esta altura de medição é mais expressiva a diminuição de u entre os dois primeiros blocos. Após esta convergência, o declive (negativo) da curva é ainda mais acentuado, com a velocidade a aproximar-se de zero nas medições efectuadas na proximidade da face anterior (e também posterior) do terceiro bloco. Quer o aumento da velocidade na entrada para o *canyon* e na esteira do último bloco, quer a diminuição entre os dois primeiros, esbatem-se gradualmente à medida que, com o aumento de z , as perturbações geradas pelos edifícios diminuem. Para a altura de 30 mm verifica-se, por outro lado, um aumento de u na passagem do escoamento sobre o último edifício. Na esteira deste, u aumenta gradualmente com o aumento de x . Contudo, a utilização do sistema de fio-quente simples não se apresenta como a técnica mais adequada à medição da velocidade em zonas onde ocorre a formação de vórtices (como resultado da perturbação exercida no escoamento pela presença de obstáculos), pelo facto de estes anemómetros não detectarem com rigor a direcção do vector de velocidade (em particular o sensor de filamento único) [Borrego, 1980]. Esta secção do domínio de estudo será analisada com mais detalhe com a apresentação dos resultados obtidos com o FLUENT (ponto 4.1.7).

4.1.4. Medição do campo de concentrações

A medição do campo de concentrações em torno da geometria de estudo foi realizada recorrendo à utilização do FID.

Detecção por ionização de chama

O princípio físico que governa o funcionamento do FID é baseado na proporção estabelecida entre a quantidade de iões produzidos durante a queima de um hidrocarboneto e o número de átomos de carbono queimados, sendo de cerca de 1 par de iões por cada 10^6 átomos de carbono que intervêm na combustão. De acordo com esta relação, a corrente máxima do FID pode ser estimada para um determinado caudal de amostragem. Considerando o hidrocarboneto C_mH_n , a corrente iónica (i) é calculada pela expressão IV-2.

$$i = \frac{Q \cdot C_{HC} \cdot N_a \cdot m \cdot e}{60 \times 10^9} \cdot \frac{P}{R_0 T} \quad [IV-2]$$

O sistema utilizado nas medições, do tipo *Fast FID*, possui um tempo de resposta máximo de 4 ms, o que permite a medição da concentração média e das respectivas flutuações em pontos onde a variação deste parâmetro é bastante rápida [Borrego *et al.*, 2000c]. O esquema de montagem do equipamento utilizado para a leitura das concentrações está esquematizado na figura B-3 (em anexo). O posicionamento da fonte de emissão do gás traçador está representado nas figuras IV-2 e IV-3 (e também na B-3, em anexo).

Dada a relação linear estabelecida entre a tensão de saída e a concentração, a calibração do sistema FID é um processo bastante simples, envolvendo o acerto do zero do aparelho sem a emissão de gás traçador (concentração nula) e o ajuste para uma amostra de concentração conhecida. A concentração de emissão utilizada foi de 20.000 ppm, tendo esta sido determinada com base na gama de leitura do aparelho. De forma a garantir o isocinetismo da emissão em relação ao escoamento, foi utilizada uma fonte de emissão de dimensões muito reduzidas e o caudal foi regulado de modo a não afectar o campo de ventos. A resolução da malha de pontos de medição foi estabelecida de modo a permitir a obtenção de um campo de concentrações suficientemente detalhado. Para tal, a amostragem foi realizada com um espaçamento entre pontos de 10, 15 e 2 mm, segundo os eixos x, y e z, respectivamente, e dentro dos limites físicos de medição da secção-de-ensaio ($0 < x \leq 250$ mm, $0 < y \leq 75$ mm e $0 < z \leq 70$ mm).

Resultados experimentais

Os campos de concentração medidos com o FID foram representados segundo o plano vertical transversal ao escoamento (yz) para x igual a 110 e 190 mm (figuras B-4 e B-5 em anexo); o plano vertical axial (xz) para y igual a 120 e 150 mm (figura B-6 em anexo e IV-7); e, finalmente, no plano horizontal (xy) para z igual a 14 e 26 mm (figura IV-13 superior e B-7 em anexo). Para uma mais fácil interpretação dos resultados, os valores foram representados em percentagem relativamente à concentração de emissão.

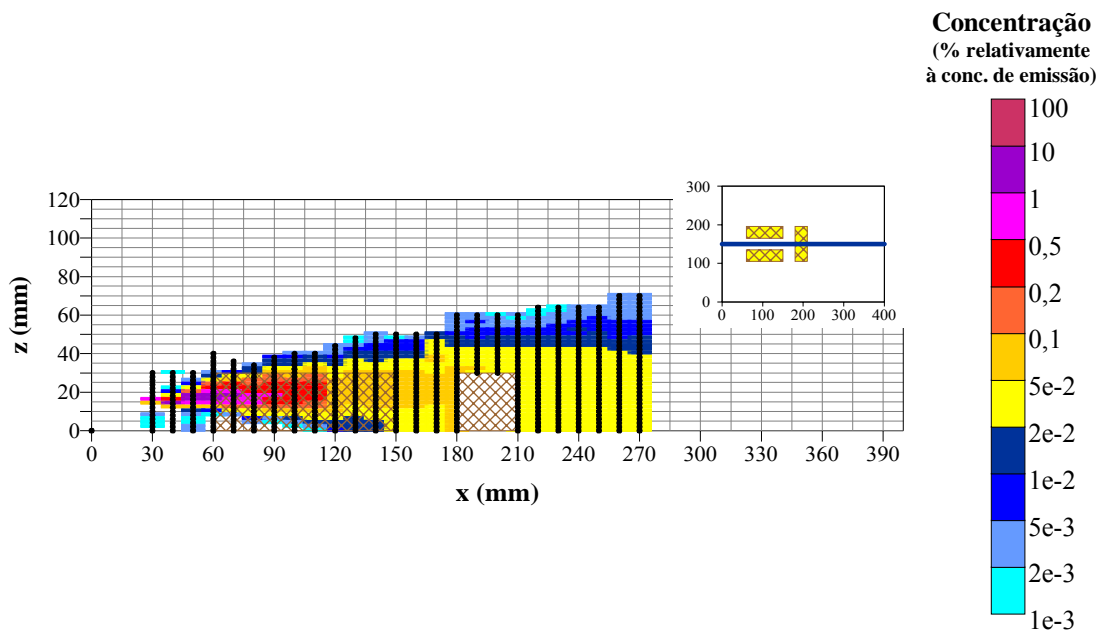


Figura IV-7 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um corte xz , para $y = 150$ mm.

Na figura anterior, a representação gráfica do campo vertical de concentrações ao longo do plano axial do túnel-de-vento torna perceptível a acentuada diminuição da concentração de traçador ao longo do eixo central entre os dois primeiros blocos, com uma redução da concentração para 0,1 % do seu valor inicial sensivelmente 8 cm após a emissão. Por outro lado, é possível distinguir um gradiente de concentrações entre o eixo central do penacho e as extremidades, de acordo com uma distribuição gaussiana, também visível no plano vertical transversal efectuado para x igual a 190 mm (na figura B-5 em anexo).

4.1.5. Aplicação do FLUENT ao caso de estudo 1

A simplicidade da configuração de estudo permitiu proceder a uma avaliação preliminar das capacidades do FLUENT, nomeadamente quanto aos resultados obtidos na malhagem do domínio de simulação e na definição da fonte de emissão.

Metodologia de simulação numérica

Na selecção do tipo de malha de cálculo a utilizar foram analisadas a qualidade e resolução obtidas com os diferentes esquemas de malhagem disponíveis. A malha que reuniu as características mais adequadas à natureza dos problemas propostos resultou da aplicação da ferramenta *TGrid* (ver pontos 3.1 e 3.2). Desta forma, com a geração de uma malha híbrida não-estruturada foi possível obter-se uma adaptação optimizada das células de cálculo à geometria de estudo. A malha foi ainda refinada recorrendo à ferramenta *Size Function* (cuja aplicação foi também abordada na secção 3.2), conseguindo-se uma maior resolução nas zonas de maior interesse do escoamento, designadamente na proximidade da fonte de emissão e das faces dos blocos (ver figura IV-8).

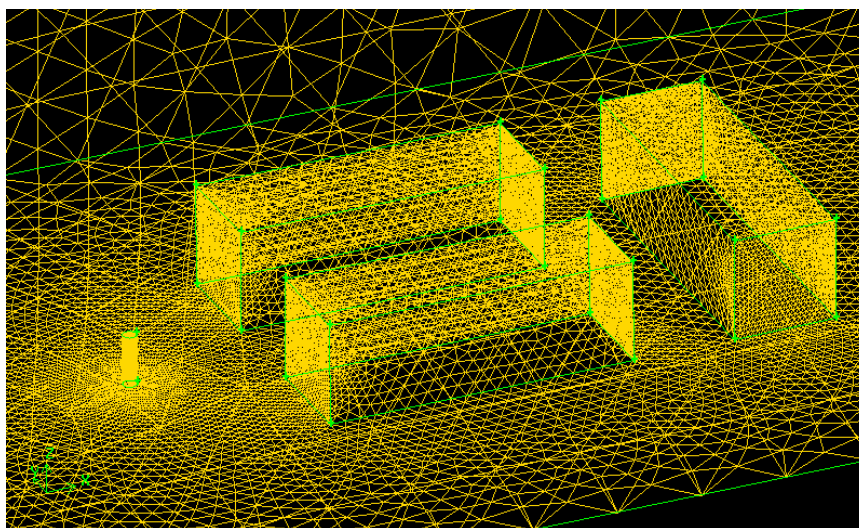


Figura IV-8 – Geometria e malhagem do domínio de cálculo do caso de teste 1.

No total foram obtidas 162932 células tetraédricas, com dimensões que variam entre os $1,4 \times 10^{-12} \text{ m}^3$, junto às faces dos blocos e fonte de emissão, e $4,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, nas zonas de menor resolução do domínio. Depois de importado pelo FLUENT, o ficheiro gerado

pelo GAMBIT com a informação relativa à malha foi ainda submetido a um tratamento prévio da forma e dimensão das células de cálculo, visando a homogeneização do domínio de cálculo.

A utilização de um ficheiro *profile* permitiu a introdução de um perfil vertical de ventos à entrada do domínio. Este ficheiro foi gerado pelo programa “Perfil_Ventos” (ver secção 3.4) com base nos resultados das medições efectuadas com o fio-quente no início da secção-de-ensaio. Com este procedimento foi conseguida uma maior aproximação da simulação numérica às condições experimentais criadas no túnel-de-vento, em particular em termos da variação da velocidade e direcção do vento com a altitude, para a CLA gerada. O modelo de turbulência $k-\epsilon$ foi o seleccionado, de acordo com o já referido no ponto 3.3, devido à relação que oferece entre a qualidade dos resultados e o esforço computacional envolvido.

A emissão do traçador foi definida através de um termo-fonte localizado na extremidade da fonte de emissão, com um caudal de emissão de 20000 ppm de propano. Para a definição das espécies químicas presentes, ar e propano, consideradas como não-reactivas, foram utilizadas as propriedades físico-químicas pré-definidas na base-de-dados do FLUENT.

Resultados da simulação

Uma das características do FLUENT que ficou patente com esta aplicação prende-se com as várias possibilidades de pós-processamento do problema, nomeadamente em termos de tratamento gráfico da solução obtida. Assim, é possível proceder à visualização de diferentes propriedades do escoamento (como as componentes da velocidade, a massa volúmica ou a turbulência) em qualquer ponto, eixo ou plano do domínio de cálculo.

Na figura IV-9 está representado o campo de ventos na forma vectorial e em linhas de contorno de igual magnitude (linhas isotáquicas), simulado pelo FLUENT para uma altura de 15 mm. Esta informação é complementada com a apresentação em anexo das componentes u , v e w da velocidade neste mesmo plano (figuras B-8 a B-10). De forma

a avaliar como as perturbações exercidas pelos blocos sobre o campo de ventos variam com a altura, apresenta-se igualmente o campo de ventos correspondente a 35 mm (figura B-11, em anexo).

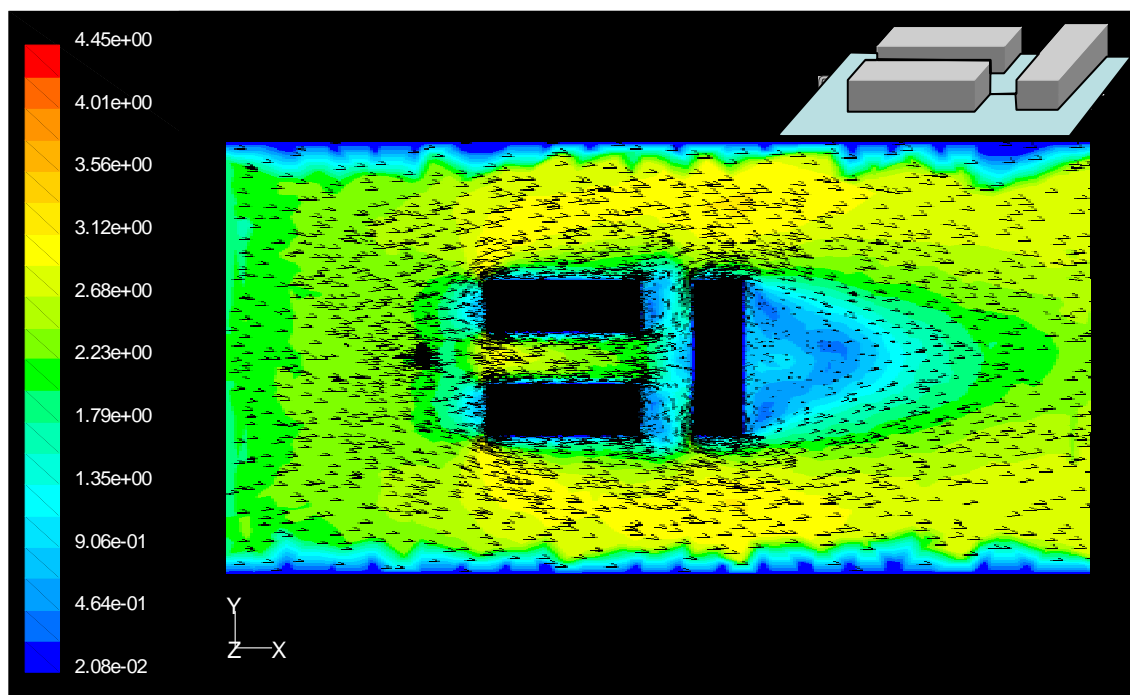


Figura IV-9 – Campo de velocidade (representado na forma vectorial e em linhas de contorno de igual magnitude), em m.s^{-1} , simulado pelo FLUENT para uma altura de 15 mm.

De acordo com a condição de não-escorregamento, todas as componentes da velocidade do escoamento em contacto com uma parede sólida (e impermeável) são nulas, aumentando gradualmente com o afastamento em relação às mesmas. A consideração desta condição-fronteira permite garantir a semelhança com a realidade física. Este comportamento é visível, na figura anterior, junto às paredes laterais dos blocos e do próprio túnel-de-vento. Por outro lado, pelo facto de se tratar de um escoamento em regime turbulento, a velocidade apresenta um perfil logarítmico na vizinhança das paredes [Costa, 1995] (ver figura IV-10).

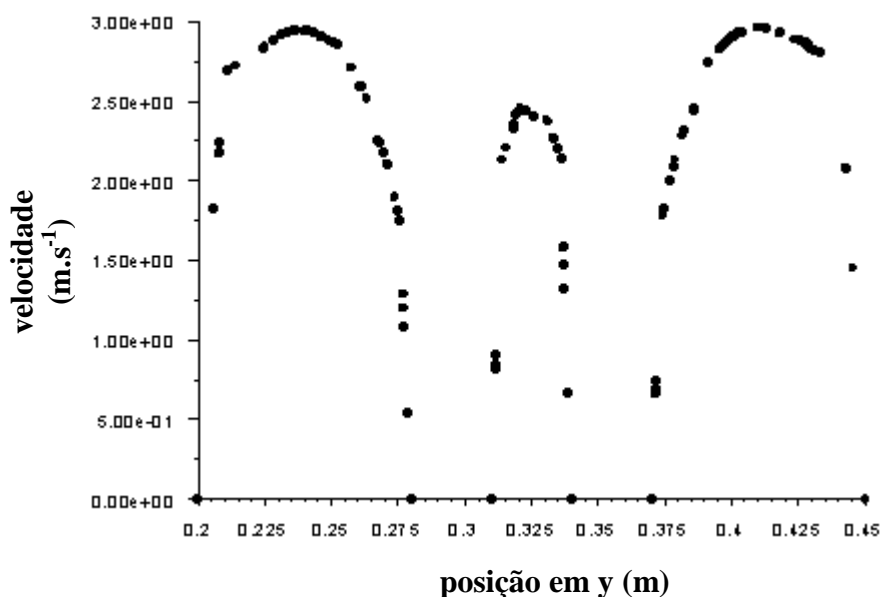


Figura IV-10 – Variação da velocidade ao longo de um eixo horizontal transversal ao escoamento, definido para $z = 15$ mm, e que intersecta o centro dos dois primeiros sólidos.

Uma das potencialidades da simulação numérica de um escoamento prende-se com a possibilidade de determinação, de forma expedita, dos valores das variáveis em estudo em qualquer ponto, eixo, plano ou espaço tridimensional do domínio. Assim, e comparativamente com a simulação em túnel-de-vento, a análise dos resultados do FLUENT permite, *a priori*, uma caracterização mais completa do escoamento. Nomeadamente, é possível verificar na figura IV-9 que ocorre uma diminuição da velocidade na face anterior dos edifícios, sendo esta ainda mais acentuada na face posterior, devido aos vórtices e recirculações aí formados (visíveis na figura B-12 e, em mais pormenor, na B-13, ambas em anexo). Esta informação é complementada pela representação das linhas de corrente no interior da secção-de-ensaio, de acordo com a simulação do FLUENT para o nível de 15 mm (ver figura B-14, em anexo).

Relativamente à simulação da dispersão, o campo de concentrações foi representado na figura IV-11, também para uma altura de 15 mm.

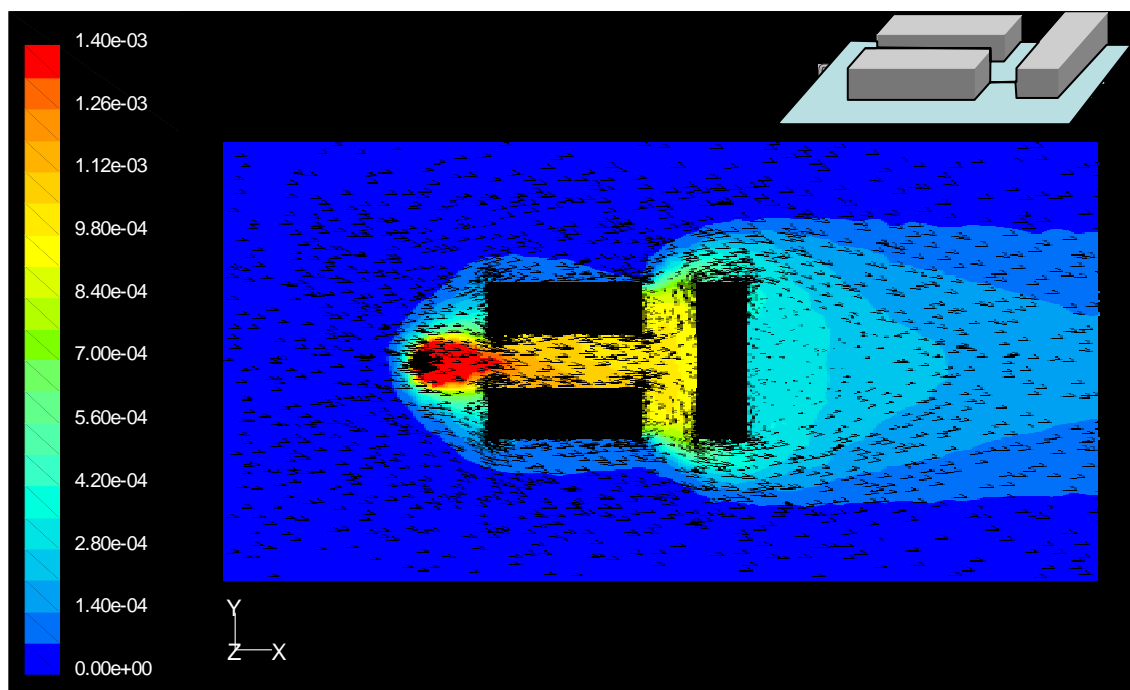


Figura IV-11 – Campos de concentrações e de ventos (vectores de velocidade), simulados pelo FLUENT para uma altura de 15 mm. A escala de cores apresentada é indicativa dos valores de concentração (em kg.m^{-3}) de propano.

Na figura anterior é possível verificar que as maiores concentrações de propano estão localizadas na área compreendida entre os três blocos e que nas superfícies laterais e na esteira do terceiro bloco ocorre uma diminuição acentuada da concentração.

4.1.6. Intercomparação de resultados experimentais e numéricos

Na figura IV-12 estão representados os cinco perfis de u no plano xz , obtidos por simulação no FLUENT e por medição com o fio-quente simples. Na figura B-15, em anexo, estes dados são apresentados segundo o módulo da diferença dos valores de u simulados (FLUENT) e medidos (fio-quente), para as cinco alturas definidas.

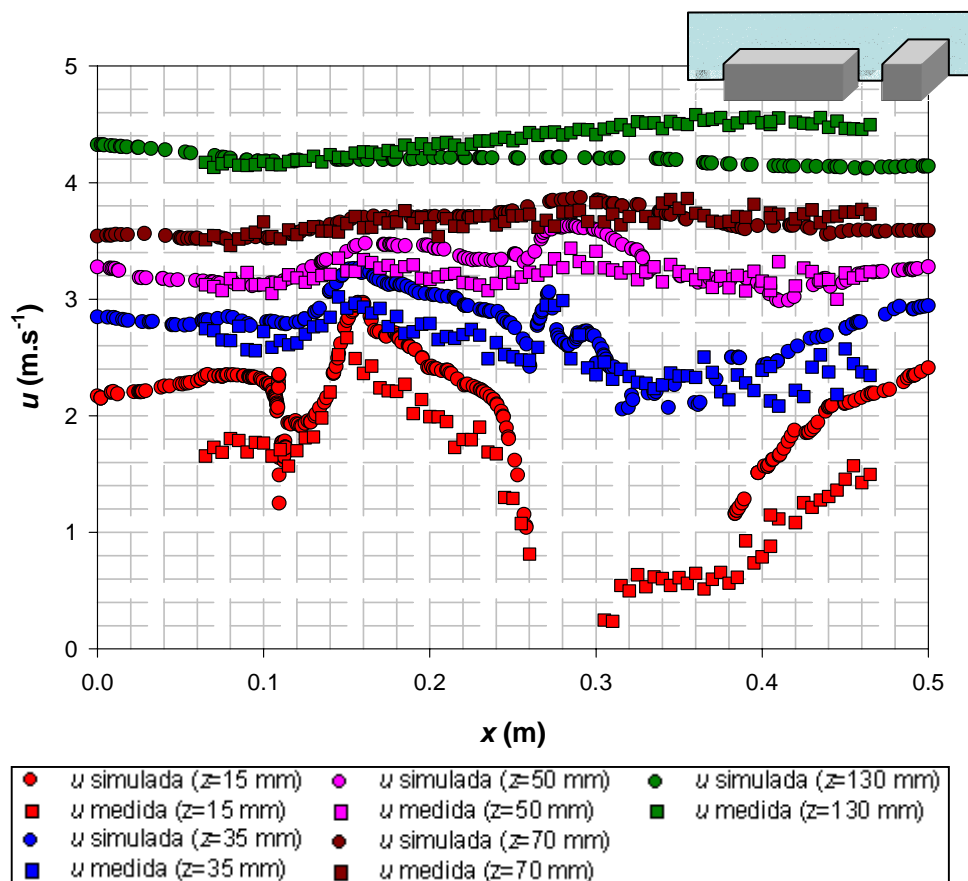


Figura IV-12 – Gráfico comparativo dos valores de u na seção-de-ensaio, de acordo com as cinco alturas de medição definidas, obtidos por simulação no FLUENT (círculos) e medidos no túnel-de-vento (quadrados).

Da análise do gráfico anterior ressalta que, de um modo geral, o modelo apresenta um bom comportamento face às medições efectuadas. Por um lado, observa-se que, com excepção de z igual a 130 mm, há uma tendência para o FLUENT sobrestimar os valores de velocidade. Por outro, as maiores diferenças entre valores medidos e simulados ocorreram em particular para o primeiro nível de medição, no qual, devido à perturbação do escoamento originada pela proximidade dos elementos, poderá não estar garantida a total fiabilidade dos valores obtidos através da anemometria de fio-quente [Borrego, 1980; Bruun, 1995].

Para uma melhor comparação, apresentam-se na figura IV-13 os campos de concentração obtidos por via experimental e numérica.

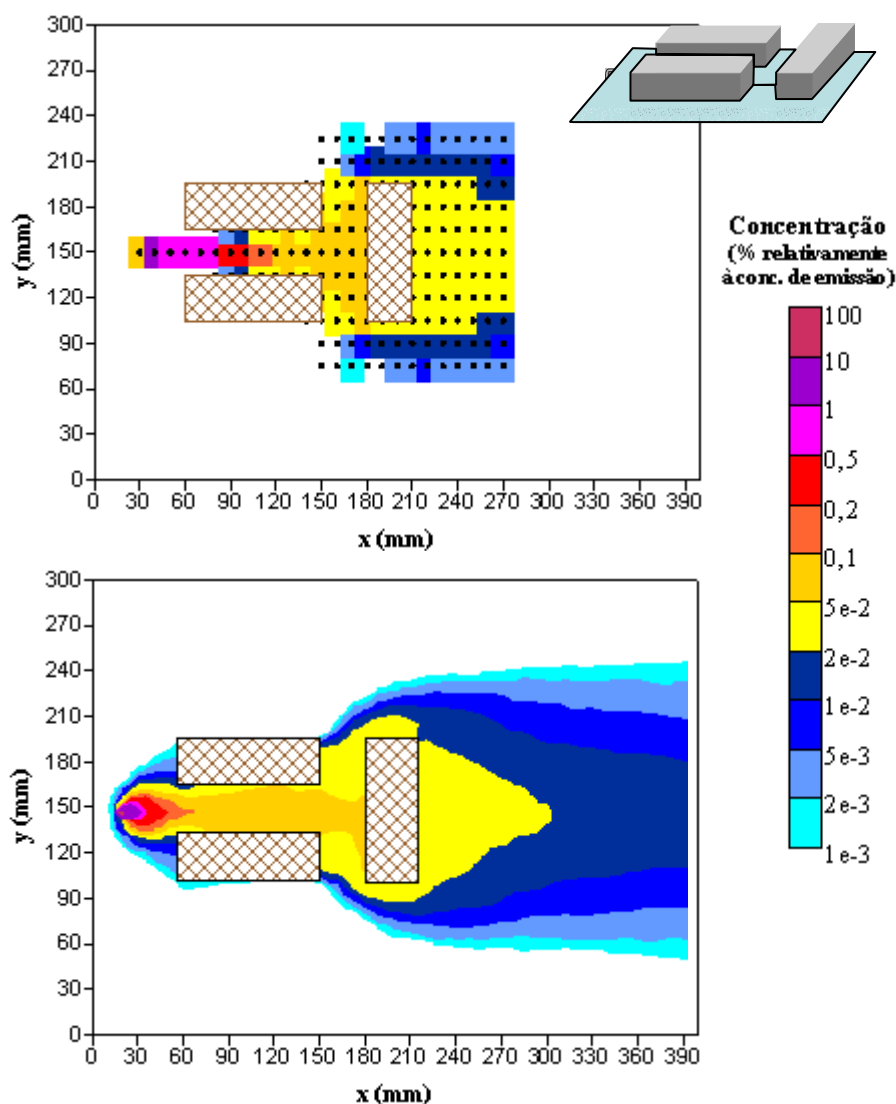


Figura IV-13 – Campos de concentração experimental (imagem superior) e simulado pelo FLUENT (imagem inferior), para um plano horizontal a 15 mm de altura.

Os campos de concentrações representados na figura anterior evidenciam uma boa relação entre as simulações e as medições efectuadas. As principais diferenças residem nas concentrações atingidas entre os dois primeiros blocos, onde existe uma tendência subestimadora do FLUENT, o que pode ser explicado pela sobrestimativa da velocidade. De acordo com o modelo, existe uma diluição muito acentuada pouco após a emissão, comportamento que não é comprovado pelas medições realizadas.

4.2. Caso de Estudo 2: Baixa Pombalina

A comparação dos resultados do FLUENT com os de outro modelo numérico foi realizada para um domínio de cálculo definido na Baixa Pombalina, em Lisboa. As simulações foram realizadas para o CO pelo facto de à escala local este poder ser considerado como um poluente passivo.

4.2.1. Qualidade do ar *versus* tráfego rodoviário na região de Lisboa

De acordo com os resultados do recenseamento geral da população realizado em 2001 (“Censos 2001”), o número de residentes na AML¹ (representada na figura IV-14) era então superior a 2,6 milhões, o equivalente a 27,1 % da população de Portugal.



Figura IV-14 – Municípios englobados na AML, com diferenciação em AML Norte, Sul e cidade de Lisboa.

¹ A AML (ver figura IV-14) é uma unidade territorial que engloba 19 Municípios: Alcochete, Almada, Amadora, Azambuja, Barreiro, Cascais, Lisboa, Loures, Mafra, Moita, Montijo, Odivelas, Oeiras, Palmela, Seixal, Sesimbra, Setúbal, Sintra e Vila Franca de Xira.

Por inerência à sua própria condição metropolitana, a AML caracteriza-se por uma elevada densidade populacional, com 808,4 hab.km⁻² em 1998; sendo este valor de 6509 hab.km⁻² na cidade de Lisboa, para o mesmo ano [INE, 2001]. Ao longo dos últimos 25 anos ocorreu na AML, em simultâneo com um expressivo aumento populacional, uma duplicação do parque automóvel, que totaliza actualmente cerca de 840 mil veículos. A circulação rodoviária em Lisboa tem vindo a degradar-se em consequência deste aumento, como o comprova o fluxo de tráfego de penetração em Lisboa superior a 300000 veículos.dia⁻¹ [DGTT, 2000], associado à disseminação da ocupação humana no espaço metropolitano.

De acordo com os resultados do “Inquérito à Mobilidade” realizado em 1998 pela DGTT [2000], o número de deslocações motorizadas realizadas diariamente pelos residentes na AML era, à data do referido estudo, de cerca de 4,86 milhões, o que representa um incremento de 37 % relativamente ao ano de 1973. Na figura IV-15 está representada esquematicamente a distribuição do número de deslocações motorizadas diárias na AML por meio de transporte.

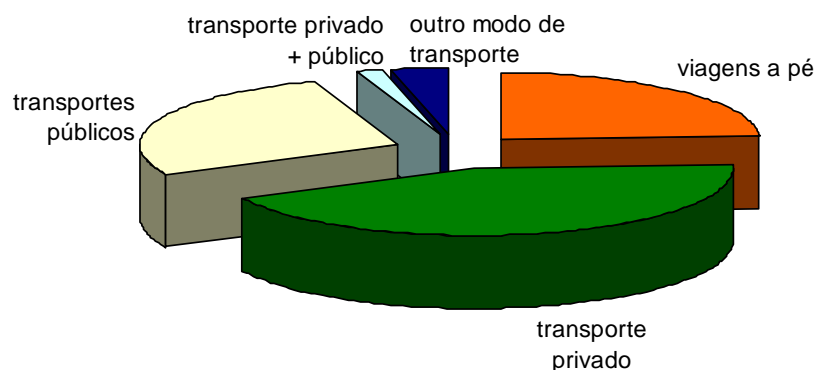


Figura IV-15 – Gráfico representativo da distribuição do número de deslocações motorizadas diárias na AML por meio de transporte.

Como esperado, com o aumento do número de automóveis por agregado familiar, ocorreu uma diminuição do número de viagens a pé e em transporte público, o que está expresso pela diminuição, no decurso dos últimos anos, da velocidade média dos serviços urbanos de transporte colectivo de superfície na cidade de Lisboa, situando-se em 1998 nos 14,8 km.h⁻¹. No entanto, num número considerável de troços esta

velocidade é reduzida, devido ao volume de tráfego e às inerentes dificuldades de circulação, para valores inferiores a 9 km.h^{-1} nos períodos de ponta da manhã e da tarde.

O panorama traçado pelas estatísticas apresentadas alerta *per si* para a necessidade de desenvolver e aplicar estratégias eficientes de controlo da poluição atmosférica em Lisboa, já anteriormente apontada em estudos que expuseram o impacto do tráfego rodoviário sobre a qualidade do ar à escala local, e também regional, nesta área [Borrego *et al.*, 2000b, 2002c]. Neste sentido, a aplicação de modelos numéricos de escala local assume-se como uma componente fundamental do processo de planeamento e gestão do tráfego rodoviário, em especial do sistema de transportes públicos, e de estabelecimento de planos adequados de gestão da qualidade do ar.

Os níveis de poluentes atmosféricos em Lisboa são consequência não só das elevadas emissões de poluentes associadas ao intenso fluxo de veículos, mas igualmente das suas características geográficas e topográficas. Neste contexto, e devido à influência do Oceano Atlântico, a região em que a cidade se insere é caracterizada por complexas circulações de mesoscala, de que são exemplo, em particular, as brisas marítimas, que impõem um padrão característico de transporte e dispersão dos poluentes atmosféricos [Barros e Borrego, 1995]. O complexo sistema de colinas (a cota do terreno na cidade de Lisboa varia entre os 6 e os 226 m) tem igualmente um efeito significativo sobre a qualidade do ar local.

4.2.2. Dados de entrada

As coordenadas dos edifícios e fontes de emissão, as condições meteorológicas locais e as emissões do tráfego automóvel constituem os principais dados de entrada dos modelos numéricos utilizados. O dia 8 de Julho de 1997 foi escolhido pelo facto de constituir um dia típico de semana para o qual estava reunida toda a informação anteriormente referida.

4.2.2.1. Selecção e caracterização do domínio de simulação

Na validação dos resultados decorrentes da aplicação de um modelo numérico constitui condição necessária a existência de dados de qualidade do ar para a zona de estudo a definir. Este foi, como tal, um dos factores primordiais na selecção de um domínio de cálculo com as características adequadas. Outro dos aspectos que presidiu à escolha prendia-se com o tipo de edifícios presentes, que deveriam ter uma forma tridimensional simples, de modo a facilitar a sua construção numérica. Este processo iniciou-se pela delimitação de oito zonas possíveis com base na localização das estações de qualidade do ar que constituem a RMQA-L (ver figura B-16, em anexo). A etapa seguinte compreendeu a análise da configuração das edificações existentes. Este processo culminou com a definição de um domínio de simulação na baixa Pombalina, que cumpria os critérios estabelecidos.

O domínio de cálculo, representado na figura IV-16 (e na perspectiva aérea da figura B-17, em anexo), está localizado entre o Terreiro do Paço e o Rossio, na proximidade do rio Tejo, ocupando uma área aproximada de 360.000 m².



Figura IV-16 – Mapa da rede viária principal do concelho de Lisboa (imagem da esquerda) e localização do domínio de simulação da baixa Pombalina, em Lisboa (rectângulo de cor vermelha) [url 1].

Esta é uma zona predominantemente residencial com uma forte componente comercial e turística, onde o intenso fluxo de tráfego propicia a ocorrência de concentrações elevadas de poluentes atmosféricos. É caracterizada por um conjunto de ruas

perpendiculares e edifícios de traça rectilínea e geometria regular, como testemunho do estilo arquitectónico que distinguiu o plano de reconstrução que se seguiu ao terramoto de 1755. Os edifícios existentes, na sua totalidade com uma altura aproximada de 15 m, foram aglomerados em 36 conjuntos de prédios contíguos e de características homogéneas, tal como está patente na representação tridimensional da figura IV-17 (e também na perspectiva da figura B-17, em anexo).

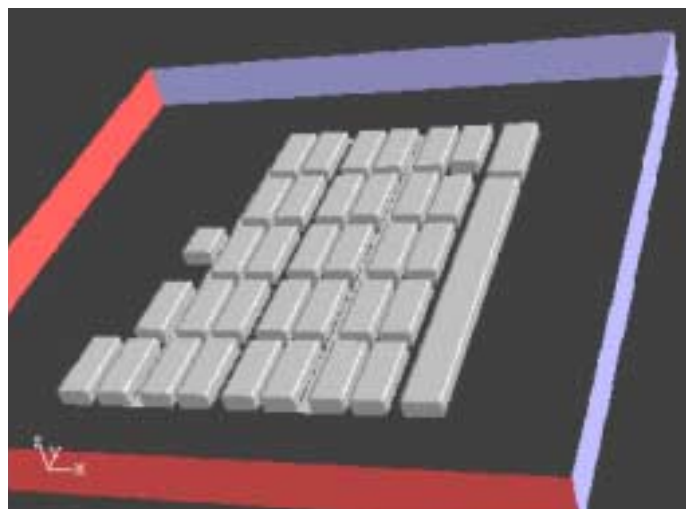


Figura IV-17 – Edifícios do domínio de simulação, com indicação das fronteiras de entrada (a azul) e de saída (a vermelho) dos modelos.

Beneficiando do facto de os edifícios apresentarem, no seu conjunto, uma orientação de 344° relativamente ao Norte, a malha de cálculo foi alinhada com esta direcção.

4.2.2.2. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados foram adquiridos numa estação com 10 m de altura localizada no Aeroporto da Portela, em Lisboa, sob gestão do IM. A distância do local de medição relativamente à área de estudo, e em particular as diferentes características topográficas das duas zonas, é um aspecto a ter necessariamente presente na análise dos resultados.

A evolução dos valores médios horários de velocidade e direcção do vento ao longo do dia de simulação é apresentada na figura IV-18. Nesta análise alerta-se para o facto de a

direcção representada graficamente ser relativa ao domínio, sendo resultante da correcção realizada com base na orientação predominante dos edifícios e ruas (344°).

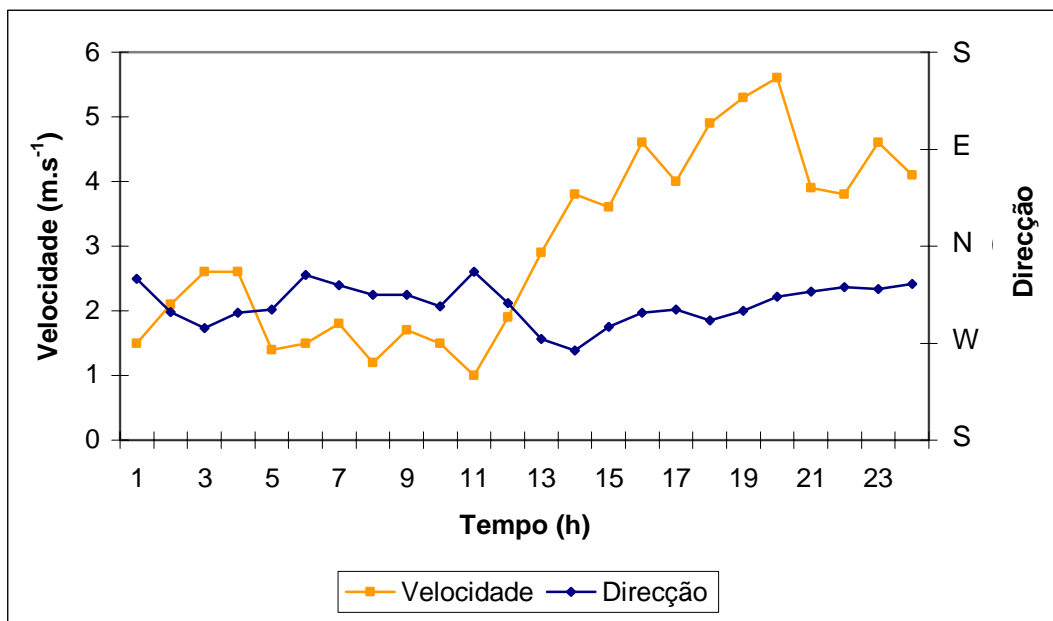


Figura IV-18 – Evolução temporal dos valores médios horários de velocidade e direcção relativa do vento, de acordo com as medições realizadas pelo IM na estação meteorológica do Aeroporto da Portela, durante o dia 8 de Julho de 1997.

No decurso do período considerado, o vento apresentou-se (relativamente ao domínio) de N/NW, com velocidades que variaram de 1 m.s⁻¹ às 10 h, até ao máximo de 5,6 m.s⁻¹ registado às 19 h.

4.2.2.3. Estimativa das emissões do tráfego automóvel

No domínio há a considerar três vias de sentido único: Prata, Ouro e Betesga, representadas na figura IV-19. A preto estão assinaladas as duas estações provisórias de contagem de tráfego, localizadas nas Ruas da Prata e Ouro, que forneceram os dados necessários à estimativa das emissões horárias.

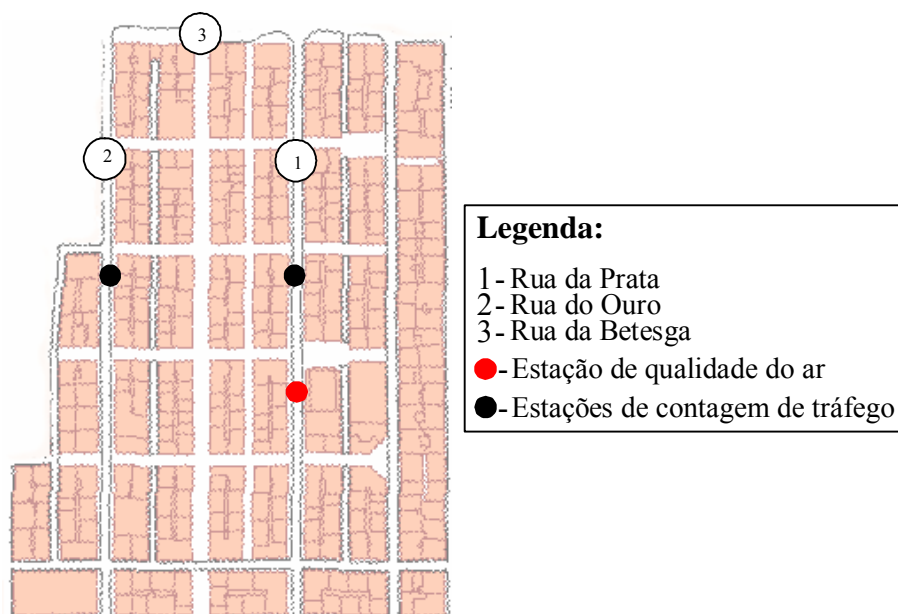


Figura IV-19 – Localização das fontes de emissão consideradas, das estações de contagem de tráfego e da estação de qualidade do ar (escala 1:4592) [url 1].

As emissões geradas pelo tráfego automóvel no domínio de cálculo considerado foram estimadas pelo modelo TREM. Este programa foi desenvolvido no DAO-UA no âmbito do projecto SUTRA², de modo a integrar uma cascata de modelos vocacionada para a estimativa do fluxo de tráfego, das emissões rodoviárias e dos campos de vento e de concentração de poluentes [Tchepel *et al.*, 2002; TREM, 2002].

O algoritmo de cálculo implementado neste modelo estima os factores de emissão com base na velocidade média de circulação dos veículos, tendo por base a metodologia MEET/COST [COST 319, 1998; MEET, 1999]. Atendendo a que o caudal de emissão depende essencialmente da capacidade do motor, do peso da viatura e da tecnologia de redução das emissões, os veículos foram agregados em 96 classes, definidas com base no ano de fabrico, no tipo e características do motor e em factores de emissão típicos. As categorias consideradas são as seguintes: automóveis de passageiros a gasolina, gasóleo e GPL, comerciais a gasolina e diesel, autocarros urbanos, táxis e motocicletas; tendo sido igualmente contemplada por Tchepel *et al.* [2002] a introdução de

² Projecto SUTRA: *Sustainable Urban Transportation for the City of Tomorrow*, com a referência EVK4-CT-1999-00013 [url 2].

tecnologias futuras, como a utilização de veículos eléctricos e de consumo híbrido. O cálculo das emissões é efectuado com base em informação detalhada do fluxo de tráfego rodoviário para cada fonte de emissão, usualmente obtida através da realização de contagens de tráfego [Borrego *et al.*, 2002a,b,c]. Em trabalhos recentes foi, como alternativa, testada a utilização do modelo de transporte VISUM (PTV) [Friedrich, 1998] na estimativa do volume de tráfego.

A versão actual do modelo permite a quantificação das emissões a quente e a frio dos seguintes poluentes: CO, NO_x, COV (incluindo metano), CO₂, SO₂ e PM10. O consumo de combustível é também estimado de modo a permitir a avaliação do desempenho do modelo através da comparação com informação estatística. A informação de saída do TREM, em taxa de emissão de poluente por segmento de rua, tem resolução temporal idêntica à dos dados de volume de tráfego introduzidos. Assim, e de acordo com a resolução dos dados de entrada, a estimativa das emissões pode ser realizada numa base horária, diária ou mesmo anual. O TREM está ligado a um SIG de modo a facilitar o processamento da informação espacial e a conversão dos dados de emissões para as especificações dos modelos de qualidade do ar, sendo a informação gerada compatível com o formato *ArcView*. Uma interface gráfica foi recentemente desenvolvida com o objectivo de possibilitar ao utilizador um acesso mais intuitivo [TREM, 2002].

Os valores médios horários de emissões de CO estimados para as Ruas do Ouro e Prata estão representados na figura IV-20. A emissão para a Rua da Betesga foi obtida assumindo a média do fluxo de tráfego das duas vias.

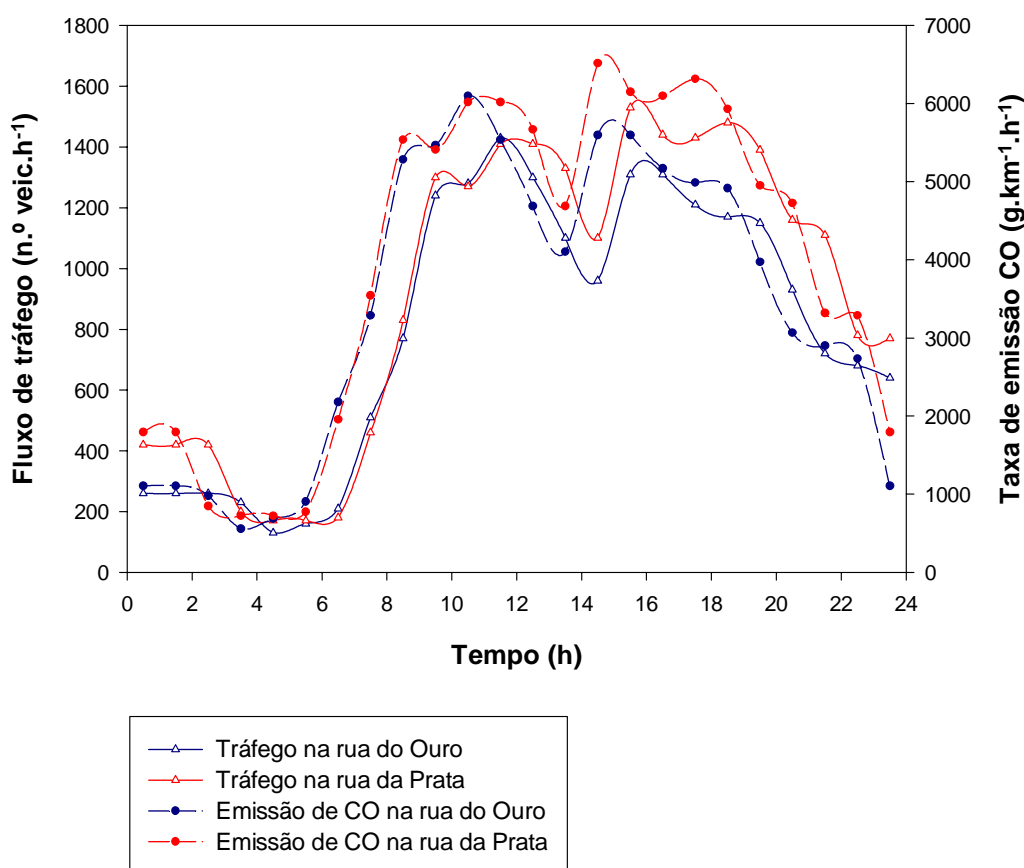


Figura IV-20 – Evolução temporal dos valores médios horários de fluxo de tráfego e das emissões de CO estimadas pelo TREM para o dia de simulação.

A evolução das emissões ao longo do tempo pode ser considerada concordante com a dinâmica diária típica do tráfego automóvel. Por outro lado, existe uma similaridade notória entre as emissões nas duas ruas. Em termos de magnitude, estas variaram entre um mínimo de $0,5 \times 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$ no período das 4 às 5 h na Rua do Ouro, e um valor máximo de $5,4 \times 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$ na Rua da Prata, atingido entre as 15 e as 16 h.

As fontes de emissão foram introduzidas no ficheiro de entrada como paralelepípedos com uma altura de 3 metros, o que permitiu considerar de forma implícita, e necessariamente aproximada, a turbulência gerada pela circulação automóvel. Este é um aspecto importante, na medida em que a dispersão de poluentes atmosféricos não resulta exclusivamente do efeito da circulação atmosférica natural, mas da sua conjugação com a turbulência induzida pelo movimento dos veículos [Kastner-Klein *et al.*, 1999]. Em especial sob as condições de vento fraco típicas de *street canyons*, as circulações atmosféricas produzidas pelo tráfego podem constituir um factor com significativa

influência na dispersão dos poluentes gerados. A realização de ensaios em túnel-de-vento dedicados ao estudo destes efeitos permitiu demonstrar que a concentração diminui com o aumento da razão entre as velocidades dos veículos e do vento [Kastner-Klein *et al.*, 1998]. Contudo, o estudo da forma como estes mecanismos se relacionam e interagem entre si está numa fase preliminar, pelo que são ainda escassos os resultados que permitam quantificar a sua importância relativa no processo de dispersão de poluentes atmosféricos em áreas urbanas.

4.2.2.4. Dados de qualidade do ar

A estação de qualidade do ar da Rua da Prata é uma das oito estações de monitorização que constituem a RMQA-L (ver figura B-16, em anexo), que a DRAOT-LVT mantém em funcionamento desde 1992. Esta estação está situada, à semelhança das da Avenida da Liberdade, Casal Ribeiro, Benfica e Entrecampos, na proximidade de uma via de tráfego intenso, sendo por isso representativa das emissões directas dos veículos automóveis. Por sua vez, as estações do Beato, Chelas e Olivais, ainda que igualmente situadas em zonas com características predominantemente urbanas, não se encontram sob a influência directa do tráfego automóvel, fornecendo valores relativos à concentração urbana de fundo (*background*).

A recolha dos dados de concentração de CO, NO_x e PM10 é realizada em contínuo, sendo toda a informação posteriormente submetida a um tratamento estatístico de validação. O acesso ao histórico de concentrações médias horárias medidas nos diferentes postos pode ser realizado *on-line* através do *site* do IA na *Internet* [url 3].

Para uma análise e interpretação mais objectivas, os dados de qualidade do ar referentes ao período de simulação foram representados conjuntamente com a evolução das emissões e meteorologia. Assim, no gráfico da figura IV-21 é apresentada a variação ao longo do tempo da velocidade do vento (em m.s⁻¹) na estação meteorológica do Aeroporto, da taxa de emissão de CO (em kg.s⁻¹) na Rua da Prata (semelhante à da Rua do Ouro, pelo que esta foi omitida) e da concentração de CO (em µg.m⁻³) medida pela estação de monitorização da qualidade do ar.

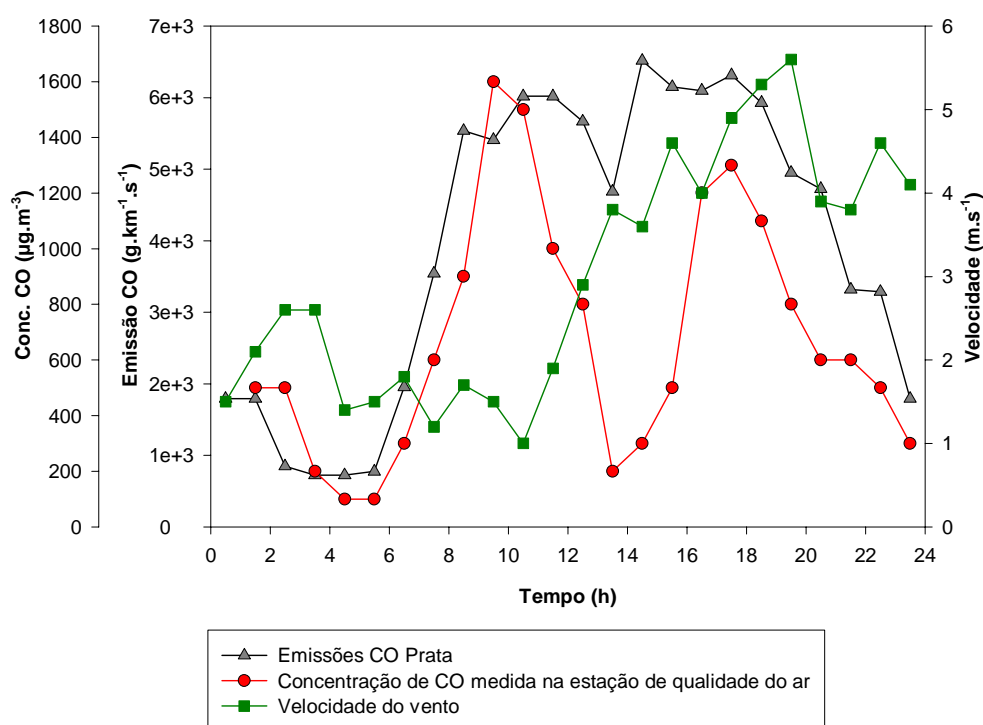


Figura IV-21 – Evolução durante o período de simulação dos valores médios horários das emissões na Rua da Prata, qualidade do ar (concentração de CO) e velocidade do vento.

Até às 10 h foi registado um aumento acentuado da concentração de CO ao nível do solo, atingindo no período das 9 às 10 h um pico de $1600 \mu\text{g.m}^{-3}$. Este comportamento está nitidamente relacionado com o aumento das emissões característico das primeiras horas da manhã e está igualmente associado às baixas velocidades do vento registadas (inferiores a 2 m.s^{-1}). Como a direcção do vento se manteve predominantemente de NW, a sua influência nesta análise pôde ser desprezada, não tendo sido, por isso, representada neste gráfico.

Até às 14 h, a concentração de CO diminuiu abruptamente até ser atingido um valor mínimo de $200 \mu\text{g.m}^{-3}$. Admitindo que durante este período as emissões do tráfego automóvel mantiveram os valores elevados estimados pelo TREM, esta diminuição poderá ser explicada pelo pronunciado aumento da velocidade do vento.

A partir das 14 h ocorreu novamente um aumento gradual da concentração de CO no ar ambiente, ainda que a velocidade do vento tenha atingido os valores mais elevados do dia. Neste período em particular não parece existir uma relação coerente que permita

explicar o aumento em paralelo da concentração de CO e da velocidade do vento, sem que as emissões tivessem sofrido um incremento proporcional. No período da tarde poderão ser significativas as incertezas associadas aos dados meteorológicos de entrada no modelo, em especial devido à distância do local onde as medições foram realizadas relativamente ao domínio de estudo. O caso de estudo da Avenida da Liberdade (secção 5 da presente dissertação) dispõe de dados meteorológicos adquiridos na proximidade das fronteiras de entrada do domínio, assegurando um maior rigor nos resultados.

4.2.3. Aplicação do VADIS ao caso de estudo 2

O modelo VADIS foi desenvolvido no DAO-UA como uma ferramenta para descrição numérica do escoamento e dispersão de uma nuvem de produtos químicos libertados num acidente industrial, em particular em situações de estabilidade atmosférica e com ventos de direcção variável, normalmente associadas a velocidades inferiores a 2 m.s^{-1} . Estas condições meteorológicas estão, de acordo com a análise estatística de séries climatológicas, presentes na generalidade dos países do sul da Europa em mais de 50 % do tempo e podem ser consideradas desfavoráveis do ponto de vista da qualidade do ar e complexas de simular numericamente [Borrego e Martins, 1994; Martins, 1998]. No âmbito do Projecto SUTRA, o VADIS foi adaptado à estimativa da qualidade do ar em zonas urbanas e à localização de *hot-spots* [Borrego *et al.*, 2002a,b,c; Tchepel *et al.*, 2002; VADIS, 2002]. No processo de validação do modelo, é de realçar a realização de um conjunto de ensaios em túnel-de-vento para intercomparação com os resultados numéricos [Martins, 1998; Martins e Borrego, 1998; Borrego *et al.*, 2000a].

O modelo VADIS possui uma estrutura bi-modular que, de acordo com a figura IV-22, integra um módulo de camada limite (FLOW) e outro para o cálculo da dispersão Lagrangeana (DISPER).

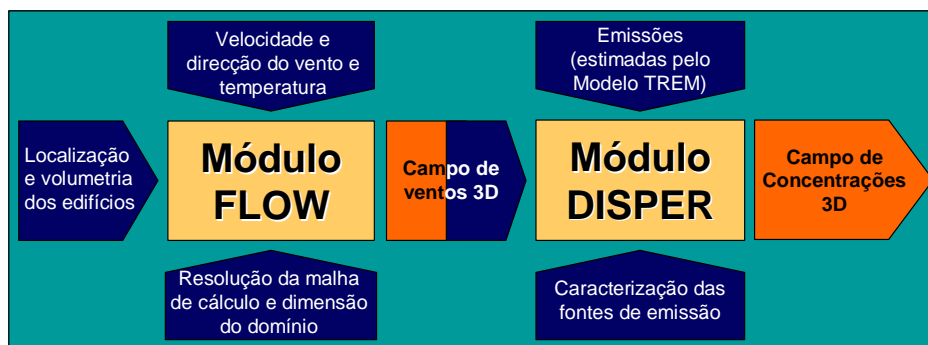


Figura IV-22 – Representação esquemática da estrutura do VADIS e do tipo de informação de entrada (a azul) e de saída (a laranja) do modelo.

Os dados meteorológicos necessários ao FLOW são a velocidade e direcção do vento à entrada do domínio (para uma altura de referência de usualmente 10 m) e a temperatura do ar. O escoamento é calculado considerando um conjunto de obstáculos definidos sobre uma malha cartesiana regular, denominada malha cartográfica ou cartesiana (ver figura IV-23), que contém a informação relativa à posição e dimensão dos edifícios e fontes de emissão. A malha de campo de ventos (ver também figura IV-23), sobreposta à anterior, está alinhada com a direcção do vento, rodando de acordo com este. A dimensão e número de células em cada eixo são definidos de acordo com o compromisso entre resolução (e exactidão do cálculo) e esforço computacional (tempo de CPU).

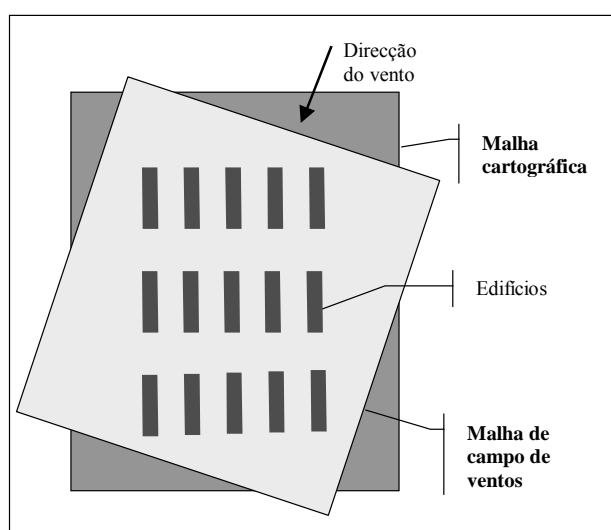


Figura IV-23 – Representação esquemática das malhas de campo de ventos e cartográfica, num plano horizontal de um domínio de cálculo hipotético.

Os obstáculos são introduzidos no programa segundo as coordenadas tridimensionais dos cantos inferior esquerdo e superior direito (na figura IV-24, pontos (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) , respectivamente), e o ângulo com a malha (compreendido entre 0 e 90 °). Um aspecto importante prende-se com a malhagem do domínio que, sendo estruturada, obriga à divisão dos edifícios de maior complexidade em blocos regulares de menores dimensões. Por sua vez, as ruas são definidas pelas coordenadas tridimensionais (pontos (x', y', z') na mesma figura) das extremidades do seu eixo axial. O modelo tem a capacidade para identificar obstáculos e fontes com sobreposição de coordenadas, garantindo assim a sua correcta definição.

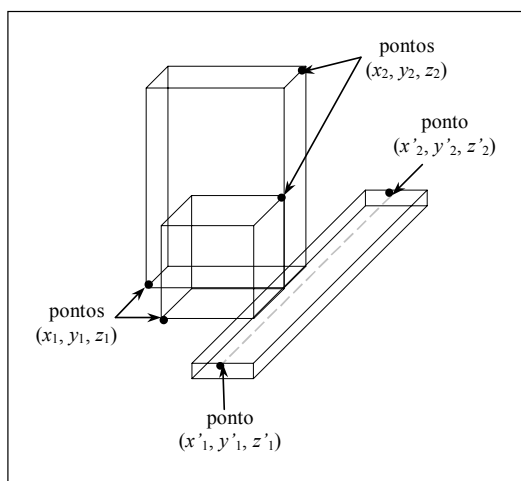


Figura IV-24 – Definição de obstáculos e fontes de emissão no VADIS.

O módulo FLOW utiliza um modelo de turbulência do tipo $k-\varepsilon$ para a estimativa dos campos tridimensionais do vento e da viscosidade turbulenta, afectados pelo conjunto de obstáculos dispostos sobre a malha cartesiana. Este módulo calcula igualmente os campos de pressão, turbulência e temperatura. No cálculo do campo de ventos o modelo aplica o método dos volumes de controlo e das diferenças finitas na resolução das equações de Navier-Stokes com média de Reynolds, considerando um escoamento estacionário em regime turbulento.

O ficheiro de saída do FLOW fornece os valores das três componentes da velocidade, da viscosidade turbulenta e da temperatura no centro de cada célula da malha cartográfica. Este ficheiro não necessita de qualquer tipo de tratamento antes de ser introduzido no módulo de dispersão Lagrangeana. É também gerado um ficheiro de

controlo do funcionamento do modelo, que contém informação complementar acerca da velocidade, pressão, temperatura, k , ε e viscosidade turbulenta.

O DISPER utiliza a informação relativa ao campo de ventos gerado pelo módulo anterior para a estimativa do campo de concentrações tridimensional, com base numa aproximação Lagrangeana [Schorling, 1987]. Esta metodologia assume que a dispersão espaço-temporal da massa de poluente emitido pode ser convenientemente representada por intermédio do cálculo do deslocamento de um número elevado de partículas numéricas libertadas no escoamento. Em contraste com a análise Euleriana, na qual a equação de conservação da massa é resolvida para volumes de controlo fixos, na Lagrangeana procede-se à determinação das trajectórias de cada uma das partículas geradas numericamente [Beça, 1986; Borrego, 1989].

O processo de cálculo do escoamento e da dispersão Lagrangeana é repetido para cada período de tempo considerado, actualizando a cada ciclo a informação relativa à velocidade, direcção do vento e taxa de emissão da espécie química em estudo. O resultado final, que contém os campos de velocidade média e de concentração, é representado na malha cartográfica.

O processo de definição dos edifícios e ruas foi simplificado procedendo à rotação da malha cartográfica de acordo com a orientação de 344° do domínio. A malhagem do domínio pelo VADIS resultou na geração de cerca de 100000 células hexaédricas regulares, de dimensões $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$. As fontes de emissão foram introduzidas como paralelepípedos com uma altura de 3 m, de acordo com o referido na secção 4.2.3.1. Como é possível verificar na representação bidimensional da figura IV-16 e na tridimensional das figuras IV-17 e B-17, os edifícios possuem, como já referido, uma geometria regular que facilita de forma significativa a sua introdução no modelo, tarefa particularmente crítica devido ao esquema de malhagem estruturada do domínio.

O campo de ventos e de concentração de CO no domínio de estudo está representado, a título de exemplo para o período das 16 às 17 h do dia de simulação, na figura IV-31 (metade superior) em comparação com os resultados do FLUENT.

4.2.4. Aplicação do FLUENT ao caso de estudo 2

Na aplicação do FLUENT à simulação da dispersão de CO na baixa de Lisboa foi utilizado o esquema de malhagem não-estruturada *TGrid* (ver secção 3), com “Função de Tamanho”, tendo sido obtidas aproximadamente 440000 células tetraédricas (figura IV-25).

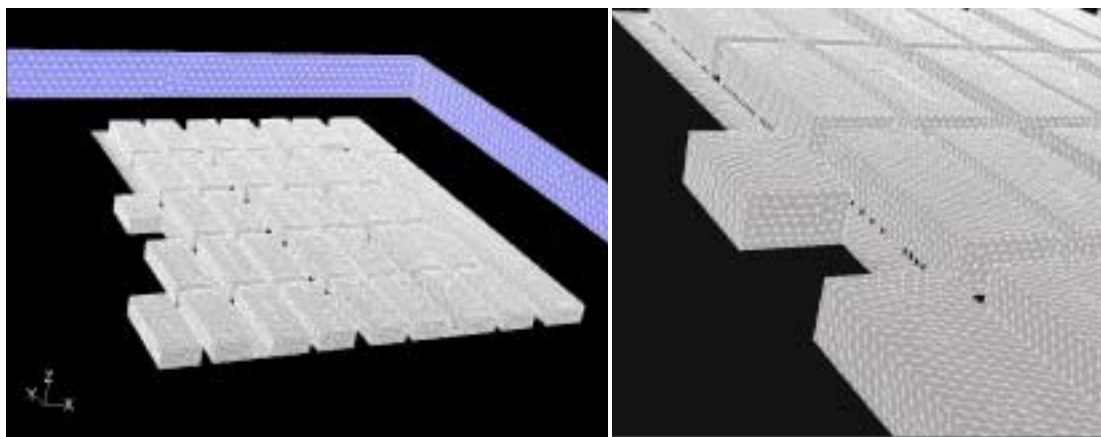


Figura IV-25 – Malhagem não-estruturada dos obstáculos gerada pelo pré-processador GAMBIT (a azul estão representadas as fronteiras de entrada do domínio de simulação).

De modo a permitir uma mais correcta intercomparação numérica foi seleccionado o modelo de turbulência $k-\epsilon$, o mesmo utilizado no VADIS. O perfil vertical de ventos à entrada do domínio foi gerado pelo programa “Perfil_Ventos” (ver secção 3.4), tendo como base de cálculo os valores de velocidade apresentados na figura IV-18. As fontes de emissão foram definidas como paralelepípedos de altura 3 m, aos quais foi adicionado um termo-fonte para introdução dos caudais de emissão calculados pelo TREM (ver figura IV-20). O cálculo da dispersão no FLUENT é efectuado através da resolução da equação [III-4] apresentada na secção 3.3, aplicada aos compostos químicos presentes: ar e CO. Para a convergência do método iterativo em cada simulação horária foram necessárias, em média, aproximadamente 200 iterações, o que correspondeu a cerca de 7 horas de cálculo. Este último valor está, contudo, intimamente dependente das características do computador utilizado. Na figura IV-26 está representado o campo de velocidades num plano horizontal de altura 3 m, no período das 16 às 17 h.

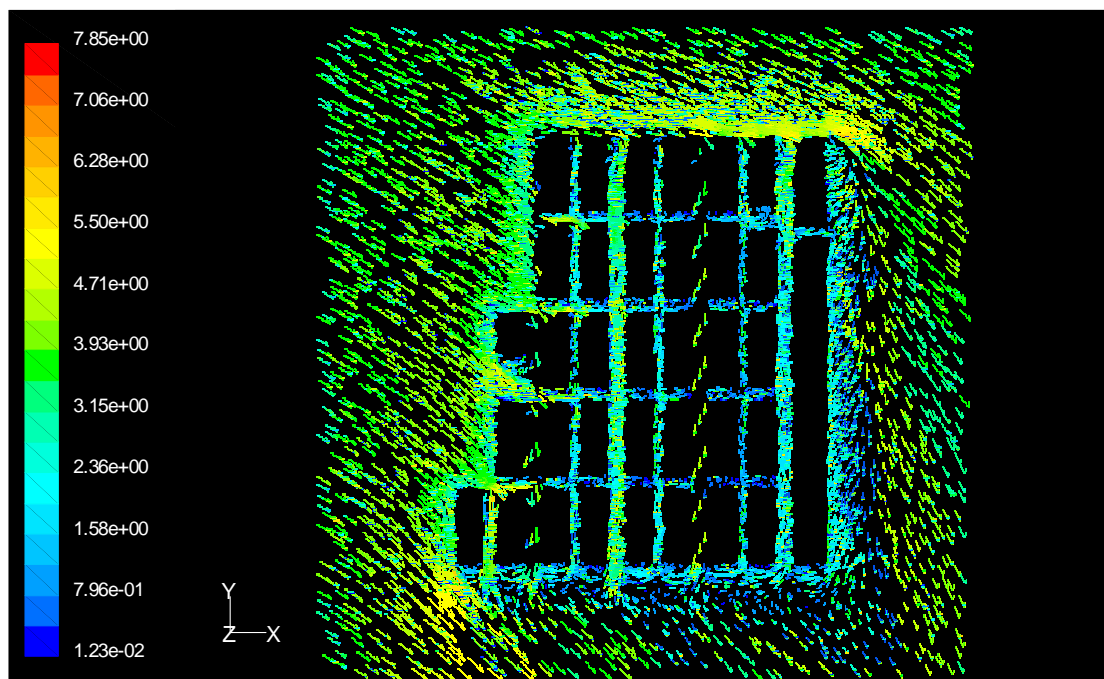


Figura IV-26 – Campo vectorial de velocidades (em m.s^{-1}) simulado pelo FLUENT para um plano horizontal de altura 3 m, correspondente ao período das 16 às 17 h.

Para o mesmo período horário estão representadas na figura IV-27 as isopletas de concentração de CO. Os campos de concentração horários obtidos pelo modelo para todo o período de simulação são apresentados nas figuras B-18 a B-41, em anexo.

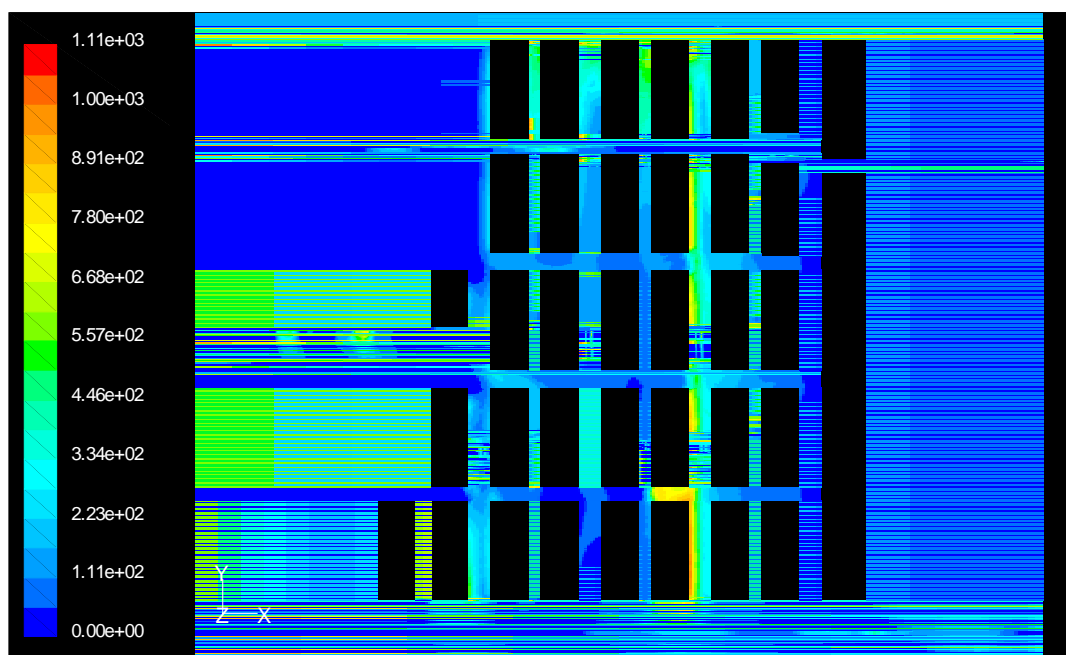


Figura IV-27 – Campo de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$) no período das 16 às 17 h, simulado pelo FLUENT para um plano horizontal de altura 3 m.

Na figura anterior é perceptível uma tendência para a acumulação de poluente junto aos edifícios do lado Oeste da Rua da Prata. Este comportamento está associado à influência da geometria do *street canyon* sobre o campo de ventos e com a direcção dos vectores de velocidade acima da cêrcea máxima dos edifícios [Mayer *et al.*, 1999], que conduzem à formação de ventos ascendentes (*upwind*) na face Oeste e descendentes (*downwind*) na face Este, tal como está patente na figura IV-28.

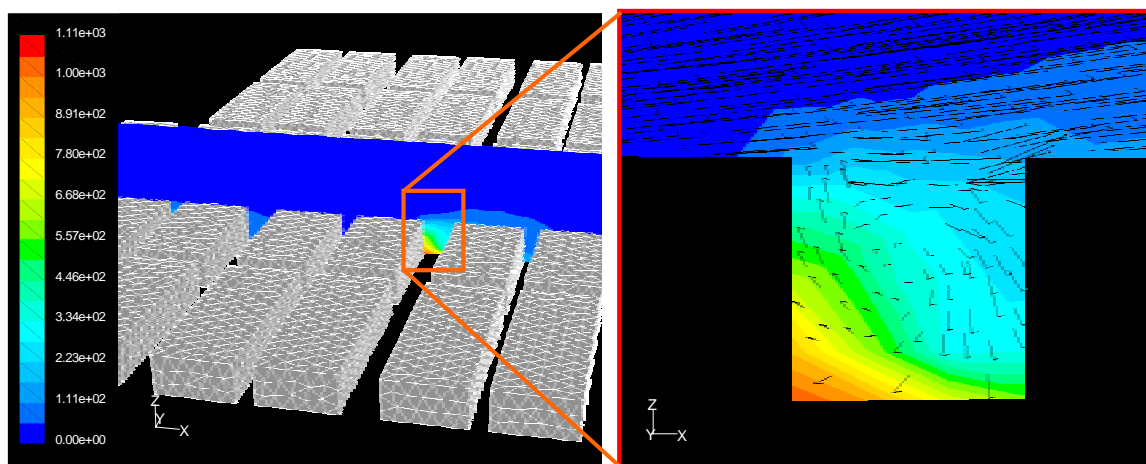


Figura IV-28 – Perspectiva tridimensional do domínio de simulação e campo de concentrações segundo um plano xz que intersecta a Rua da Prata (na imagem da esquerda) e pormenor dos vectores de velocidade entre dois edifícios nesse plano (na imagem da direita).

Nestas condições, e atendendo a que os ventos dominantes são de NW, as concentrações no lado Oeste atingem com facilidade valores duas vezes superiores aos encontrados no lado oposto. Este gradiente levanta, naturalmente, a questão da representatividade das concentrações medidas nesta estação de qualidade do ar, devido à sua localização a Este da Rua da Prata.

4.2.5. Intercomparação dos resultados numéricos

No gráfico da figura IV-29 é apresentada a evolução dos valores de concentração de CO, medidos e simulados pelos modelos VADIS e FLUENT, durante as 24 horas analisadas.

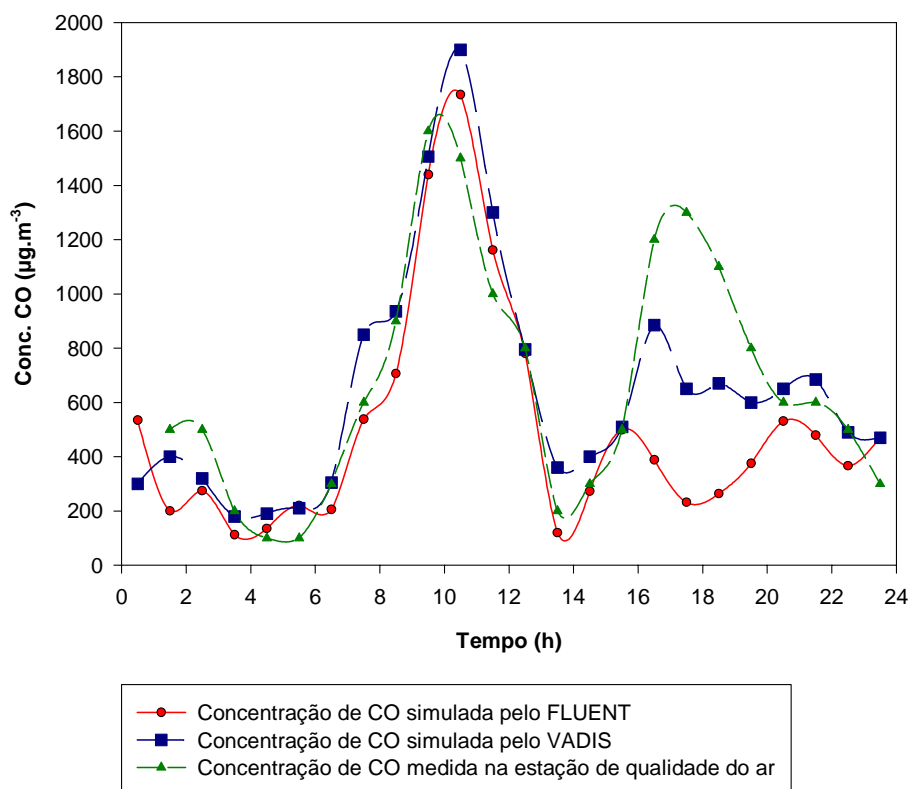


Figura IV-29 – Evolução temporal das concentrações médias horárias de CO obtidas durante o período em análise por medição na estação de qualidade do ar e por simulação com os modelos VADIS e FLUENT.

Do gráfico anterior ressalta que, com excepção do período compreendido entre as 15 e as 20 h, os modelos permitiram obter valores próximos das medições realizadas. A diferença encontrada durante a tarde poderá estar relacionada com a incerteza associada aos dados de entrada, principalmente em termos de meteorologia e emissões. Refira-se, para além do erro cometido com a consideração de valores médios horários de velocidade e direcção do vento (admitindo condições estacionárias na execução das simulações horárias), a imprecisão cometida com a introdução de dados meteorológicos referentes a um local situado fora do domínio de estudo. Quanto às emissões, têm especial importância os erros implícitos à metodologia de cálculo, designadamente ao nível das classes de veículos e dos factores de emissão considerados.

A presente análise pode ser enriquecida complementando a informação anteriormente expressa com a dos gráficos da figura IV-30, que representam a relação entre os valores

simulados pelo FLUENT e VADIS (gráfico da direita) e destes com as concentrações medidas (gráfico da esquerda).

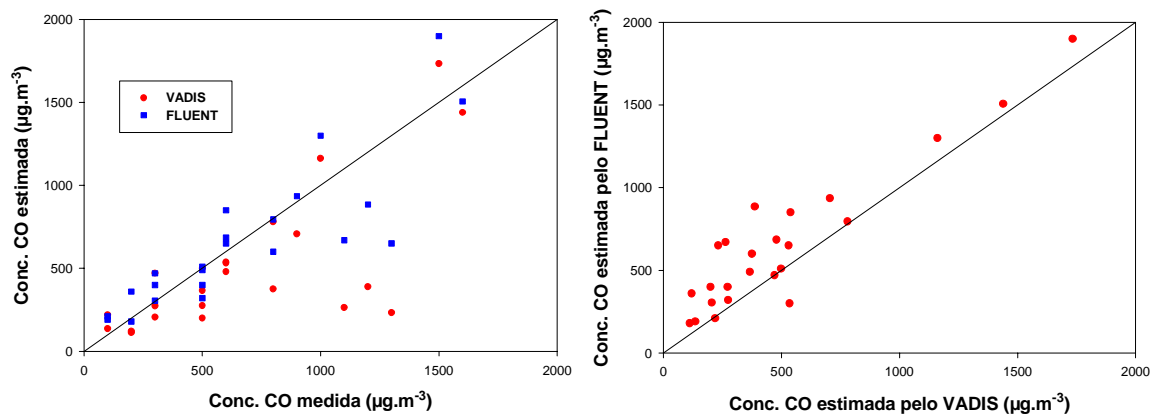


Figura IV-30 – Relação entre os valores simulados pelo FLUENT e VADIS com os dados de qualidade do ar medidos (no gráfico da esquerda) e entre os resultados obtidos com cada um dos modelos (no gráfico da direita).

De acordo com o gráfico da esquerda, o FLUENT permitiu, de um modo geral, a obtenção de concentrações de CO mais próximas das medidas na estação de monitorização da qualidade do ar. Esta conclusão resulta do menor afastamento dos valores obtidos com este modelo relativamente à recta oblíqua que representa uma relação óptima entre valores medidos e simulados. Por outro lado, verifica-se que o VADIS apresenta uma tendência subestimadora, também expressa no gráfico da direita, sendo para valores de concentração de CO intermédios (entre 700 e 1300 $\mu\text{g.m}^{-3}$) que os valores estimados mais se afastam dos medidos.

Na figura IV-31 são apresentados os campos de ventos e concentração simulados pelo FLUENT (imagem superior) e VADIS (imagem inferior) para o período das 16 às 17 h.

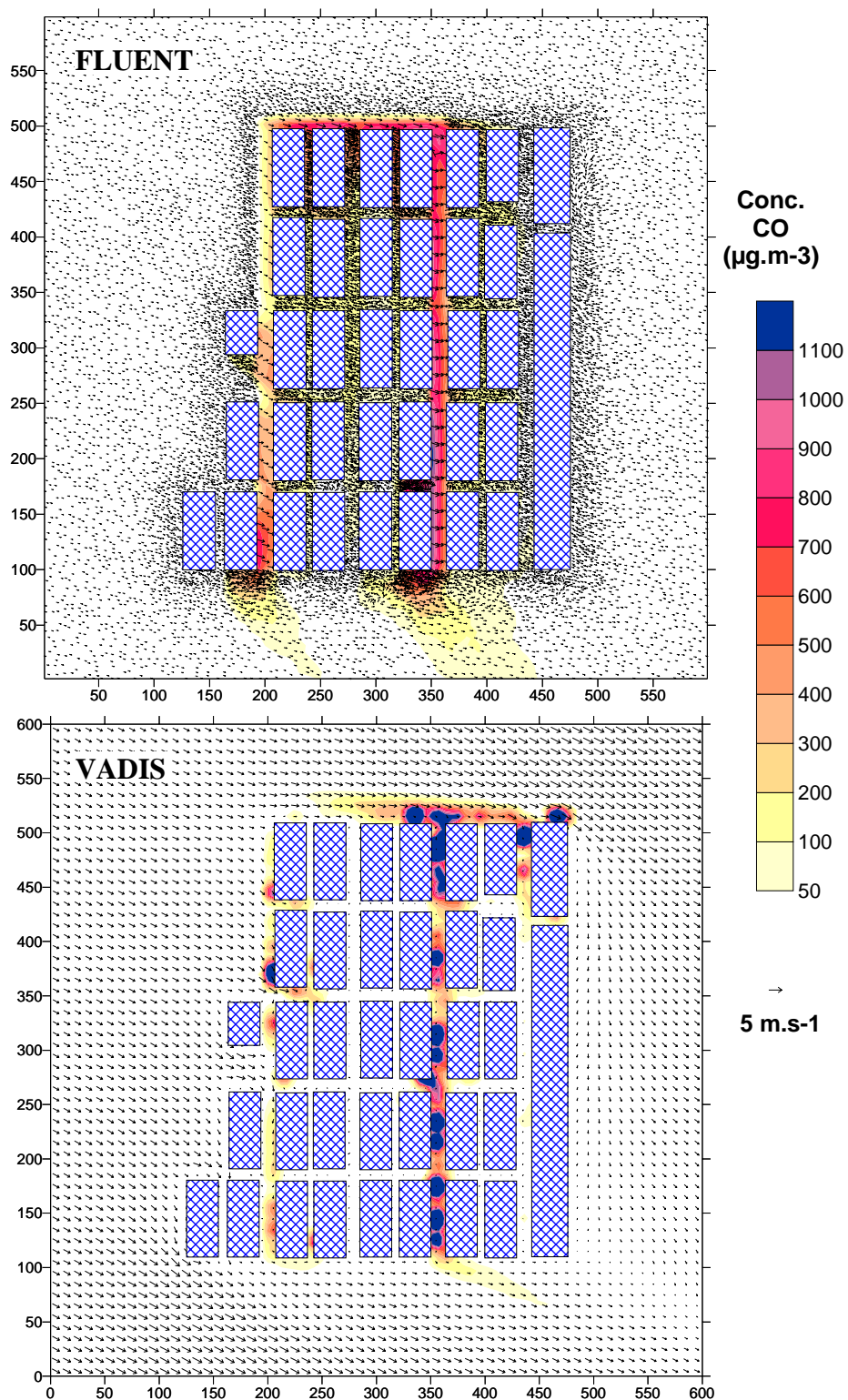


Figura IV-31 – Representação vectorial do campo de ventos e linhas isopletas de concentração de CO simulados com o FLUENT e VADIS para o período das 16 às 17 h.

De acordo com as simulações realizadas, as concentrações mais elevadas de CO estão localizadas, tal como esperado, na proximidade das fontes emissoras, e em particular nas zonas de recirculação de alguns edifícios, que favorecem a ocorrência de *hot-spots*. Devido aos ventos predominantes de NW, a qualidade do ar na zona pedonal circunscrita pelas três vias é directamente influenciada pelas emissões das Ruas da Prata e Betesga. Este comportamento é mais notório no FLUENT. Da comparação das duas imagens é possível verificar que segundo os resultados obtidos com o VADIS existe uma maior tendência para a existência de *hot-spots* no domínio, havendo uma dispersão mais homogénea com o FLUENT. Contrapondo esta observação com as conclusões resultantes da análise da figura IV-30 decorre que o comportamento subestimador do VADIS anteriormente observado se verifica, na verdade, unicamente no local da estação de medição da qualidade do ar.

Na análise das diferenças encontradas nas simulações realizadas com os dois modelos devem ser tidas em consideração as características de base de cada um. Assim, apesar de em ambos ter sido aplicado o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ e terem sido consideradas iguais condições de inicialização, o tipo e resolução das malhas de cálculo são bastante distintos. Em especial, é possível verificar que, pelo facto de o VADIS recorrer a uma malha estruturada com células de dimensões $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ (a resolução mais adequada para este modelo atendendo ao esforço computacional envolvido), cada fonte de emissão é representada transversalmente unicamente por duas células. O FLUENT, por sua vez, distribui neste mesmo intervalo entre 5 a 10 células, o que permitirá, à partida, uma melhor representação dos fenómenos de microscala envolvidos no escoamento e na dispersão.

Outro aspecto relevante prende-se com o facto de o FLUENT aplicar uma aproximação Euleriana na simulação da dispersão do poluente, enquanto o VADIS opta por uma aproximação Lagrangeana. Segundo Zannetti [1990], esta última pode ser considerada mais vantajosa pelo facto de possuir uma capacidade de simulação equivalente à LES, reproduzindo as principais características do comportamento estocástico da atmosfera com custos computacionais inferiores e sem resolver explicitamente as equações de Navier-Stokes.

5. APLICAÇÃO DO FLUENT À AVENIDA DA LIBERDADE

Concluído o processo de validação do modelo (descrito no capítulo anterior), mostrava-se relevante definir um caso de estudo de características mais complexas, em particular no que se refere à volumetria dos edifícios, que representasse uma maior exigência em termos de computação numérica, permitindo assim explorar as capacidades do FLUENT e o seu desempenho naquelas que são, na realidade, as vulgares condições de avaliação da qualidade do ar em zonas urbanas. Foi assim definido um domínio centrado sobre a Avenida da Liberdade, em Lisboa.

5.1. Caracterização do domínio de simulação

A área de simulação (figura V-1) seleccionada está localizada a cerca de 500 m a Norte do domínio definido na Baixa Pombalina para o caso de estudo 2 (secção 4.2), caracterizando-se pela existência de um conjunto de edifícios de geometria heterogénea e por ruas de distribuição irregular.

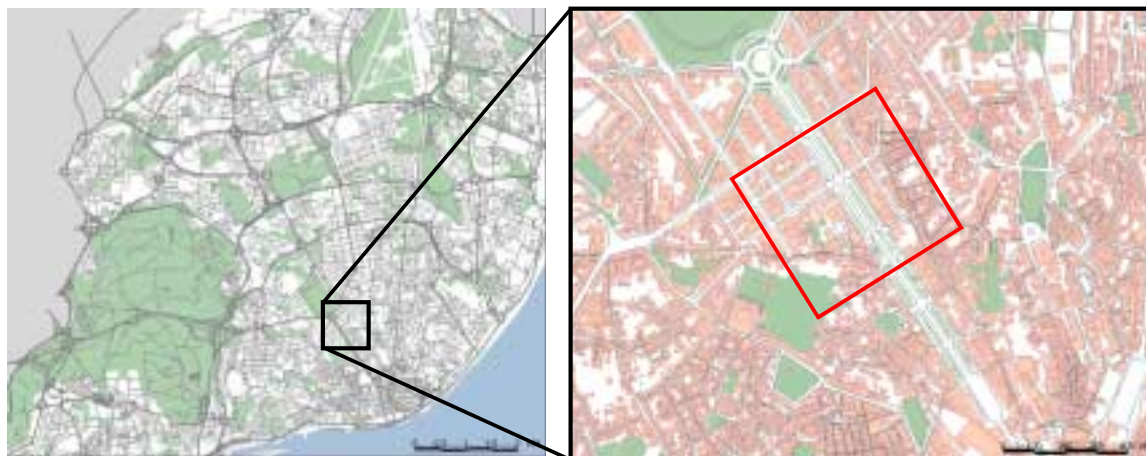


Figura V-1 – Mapa da rede viária principal do concelho de Lisboa (imagem da esquerda) e localização do domínio de simulação da Avenida da Liberdade (rectângulo de cor vermelha) [url 1].

A construção da Avenida da Liberdade foi iniciada em 1879, estabelecendo actualmente a ligação do Rossio ao Parque Eduardo VII. Esta artéria assume um papel influente na

vida quotidiana lisboeta como centro empresarial e financeiro e como área de lazer e comércio.

Os dados de entrada para inicialização do FLUENT, descritos nas secções seguintes, englobam, à semelhança do caso de estudo antecedente, a localização e volumetria dos edifícios e ruas existentes na área, a caracterização das condições meteorológicas locais para o dia de simulação e as concentrações de CO emitidas pelo tráfego automóvel.

5.2. Definição numérica da geometria de cálculo

O domínio de cálculo definido, representado nas figuras V-2 e C-1 (em anexo), tem dimensões de $700\text{ m} \times 700\text{ m} \times 80\text{ m}$, englobando um conjunto heterogéneo de edifícios e uma complexa rede viária (ver ponto 5.4). A área considerada apresenta uma orientação de 323° . A representação tridimensional dos edifícios no FLUENT foi simplificada através da sua aglomeração de acordo com as características geométricas (em particular em função da altura máxima). No total foram considerados 42 blocos, com alturas que variam entre os 12 e os 40 m (ver figuras V-2 e V-3).

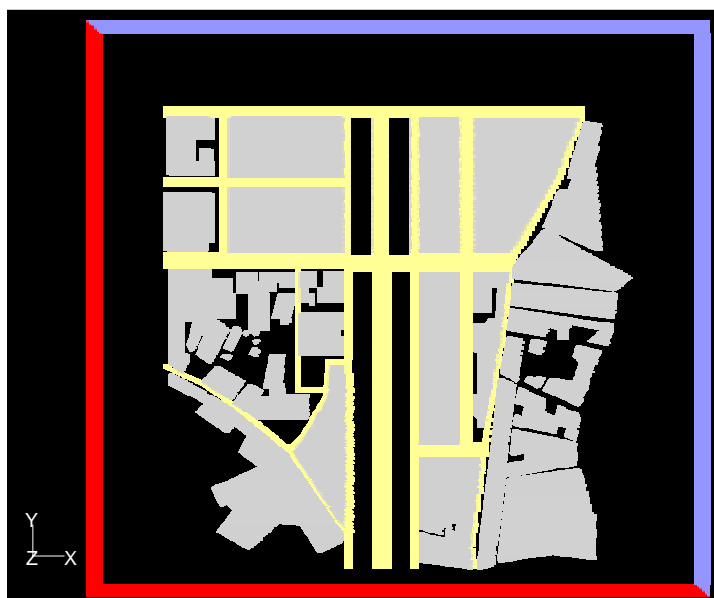


Figura V-2 – Vista de topo dos edifícios (a cinzento), fontes de emissão (a amarelo) e fronteiras de entrada (a azul) e saída (a vermelho) do domínio (para a direcção de vento NW).

A malhagem do domínio de cálculo (figura V-3) foi realizada com o processador *TGrid* do GAMBIT, com “Função de Tamanho”, tendo sido obtidas cerca de 700000 células tetraédricas não-estruturadas. Nesta situação específica, tornaram-se evidentes as vantagens de recorrer a uma malha deste tipo.

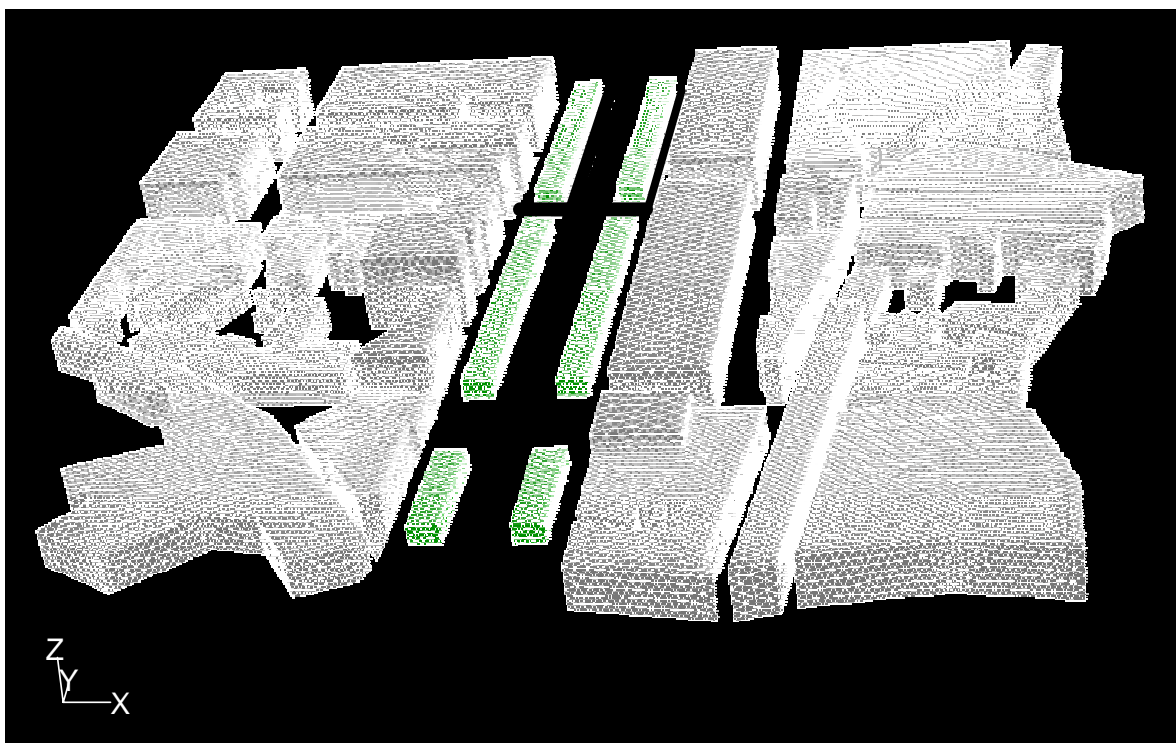


Figura V-3 – Perspectiva tridimensional dos obstáculos presentes no domínio de estudo (edifícios representados a cinzento e árvores a verde) e respectiva malhagem gerada pelo pré-processador GAMBIT.

O corredor central da Avenida da Liberdade é ladeado, em toda a sua extensão, por áreas pedonais que criam uma separação relativamente às duas faixas de circulação laterais (ver figura C-1, em anexo). Nestas áreas está presente um conjunto de árvores que exercem, dado o seu grande porte, um efeito sobre o escoamento atmosférico local e, consequentemente, sobre a dispersão dos poluentes. Este aspecto assume uma importância ainda maior se atendermos ao facto de que a estação de monitorização da qualidade do ar está situada numa destas zonas arborizadas, pelo que as medições realizadas serão necessariamente influenciadas pela sua presença. Como tal, a simulação das condições de escoamento e da dispersão de poluentes atmosféricos nesta área estaria forçosamente incompleta sem a consideração destas perturbações, pelo que se procedeu à sua introdução no cálculo.

Procedimento para introdução da canópia

De modo a não tornar a simulação incomportável do ponto de vista computacional, a estrutura tridimensional altamente complexa das árvores foi aproximada para uma forma geométrica mais simples constituída por seis paralelepípedos com uma altura de 10 m e largura e comprimento variáveis. Estes volumes foram distanciados 5 m do solo, que representa o comprimento médio dos troncos. De modo a simular os efeitos gerados pela vegetação sobre os campos de velocidade e concentração, foi atribuída uma porosidade de 50 % a cada volume através da introdução de um termo-fonte. Este termo estabelece uma relação com a velocidade de acordo com a equação V-1 [Fluent, 2001a].

$$S_i = C_0 |v|^{C_1} = C_0 |v|^{(C_1-1)} v_i \quad [\text{V-I}]$$

Os valores da porosidade e dos coeficientes empíricos C_0 e C_1 foram definidos tendo como objectivo a obtenção de um perfil vertical para a velocidade do vento similar aos encontrados na bibliografia para o tipo de canópia a que se refere [DWIA, 2002; England *et al.*, 2000; Fischenich, 2000; Raupach *et al.*, 2000].

Na figura V-4 é apresentada a variação da velocidade com a altura em três eixos verticais de um dos volumes considerados, permitindo a análise da evolução desta variável ao longo do meio poroso. Na imagem da direita destacam-se os primeiros 20 m em altura, nos quais é mais significativa a influência da canópia.

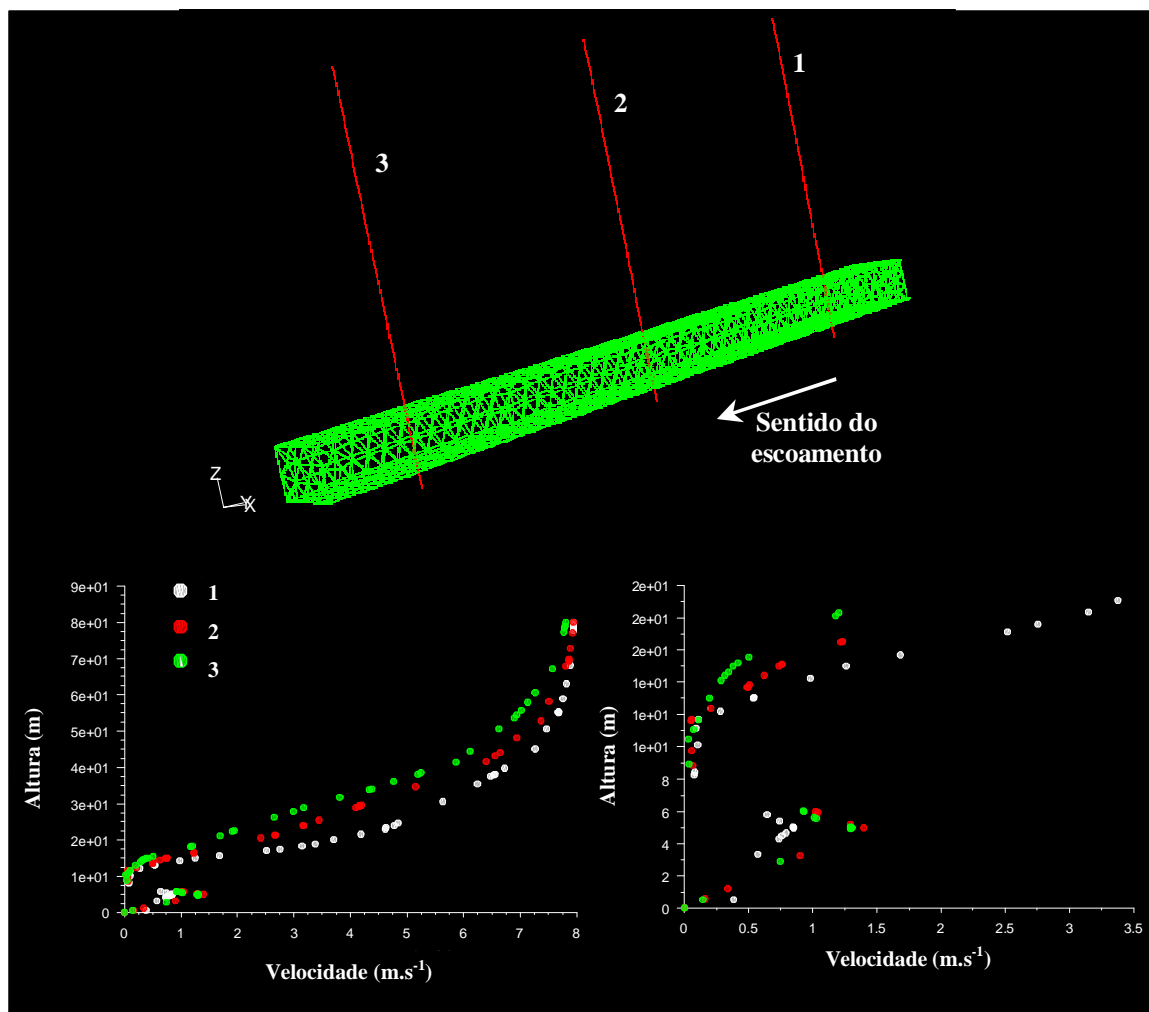


Figura V-4 – Representação dos perfis verticais de velocidade obtidos pelo FLUENT em cada um dos eixos representados. O gráfico da direita representa unicamente os primeiros 20 m de altura.

Os perfis simulados pelo FLUENT e representados na figura anterior apresentam o esperado decaimento da velocidade como resultado da força de arrasto induzida pela vegetação. Nos 20 m iniciais (gráfico da direita) verifica-se, contudo, a particularidade de os valores mais baixos deste parâmetro serem encontrados na proximidade da entrada do meio poroso (eixo 1), o que induz um abaixamento brusco da velocidade com a penetração do escoamento na canópia.

5.3. Dados meteorológicos

O dia 6 de Março de 2002 foi escolhido, à semelhança do caso de estudo 2, com base na disponibilidade de informação meteorológica e de qualidade do ar para um período considerado representativo das condições típicas de tráfego rodoviário nesta área urbana. Os dados de temperatura, velocidade e direcção do vento foram medidos na estação meteorológica do Instituto Geofísico (cuja localização está representada no mapa da figura B-16, em anexo). No gráfico da figura V-5 apresentam-se os valores de velocidade e direcção relativa do vento no dia estudado.

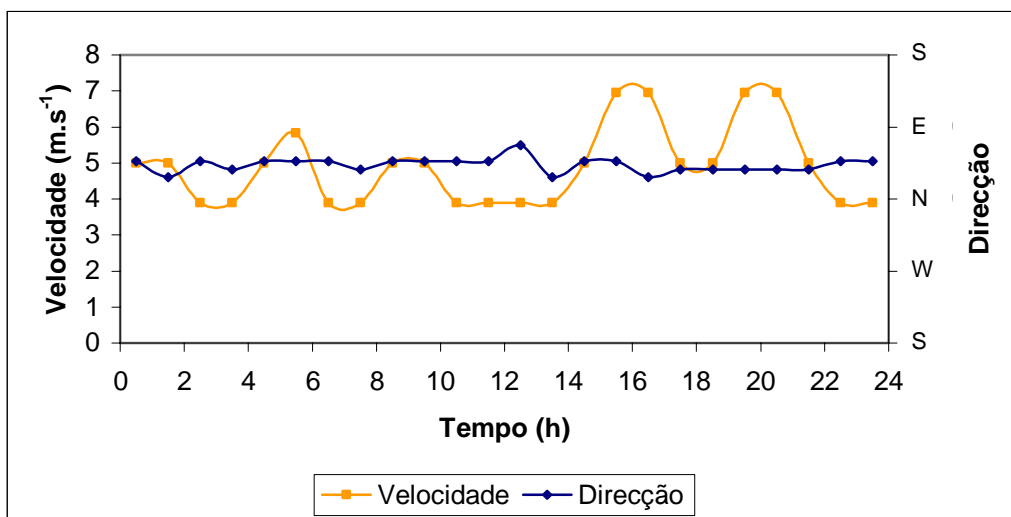


Figura V-5 – Evolução temporal dos valores médios horários de velocidade e direcção relativa do vento durante o dia 6 de Março de 2002, adquiridos na estação meteorológica do Geofísico.

Durante o período de simulação a velocidade do vento registou variações acentuadas e repetidas entre um mínimo de 4 m.s^{-1} (das 2 às 4 h, das 6 às 8 h, das 10 às 14 h e das 22 às 24 h) e um máximo de 7 m.s^{-1} (das 15 às 17 h e das 19 às 21 h). A direcção do vento relativamente ao domínio manteve-se predominantemente de NE. Nesta análise alerta-se uma vez mais para o facto de a direcção representada ser resultado da correcção realizada com base na orientação de 323° do domínio.

Os perfis verticais da velocidade do vento nas fronteiras de entrada do domínio foram determinados para cada hora de simulação com o auxílio do programa “Perfil_Ventos” a partir dos valores medidos.

5.4. Dados de emissões do tráfego automóvel

A principal fonte de emissão presente no domínio de cálculo é a Avenida da Liberdade, sendo esta constituída por uma via central com cinco faixas de rodagem, três no sentido ascendente e duas descendentes, e por duas faixas laterais secundárias, de sentidos opostos. Foram igualmente consideradas as Ruas de Alexandre Herculano e Barata Salgueiro; e como fontes de menor emissão, as Ruas Mouzinho da Silveira, Rosa Araújo, Rodrigues Sampaio, de Santa Marta, Júlio César Machado e do Salitre. As fontes de emissão referidas estão representadas nas figuras V-6 e C-2.

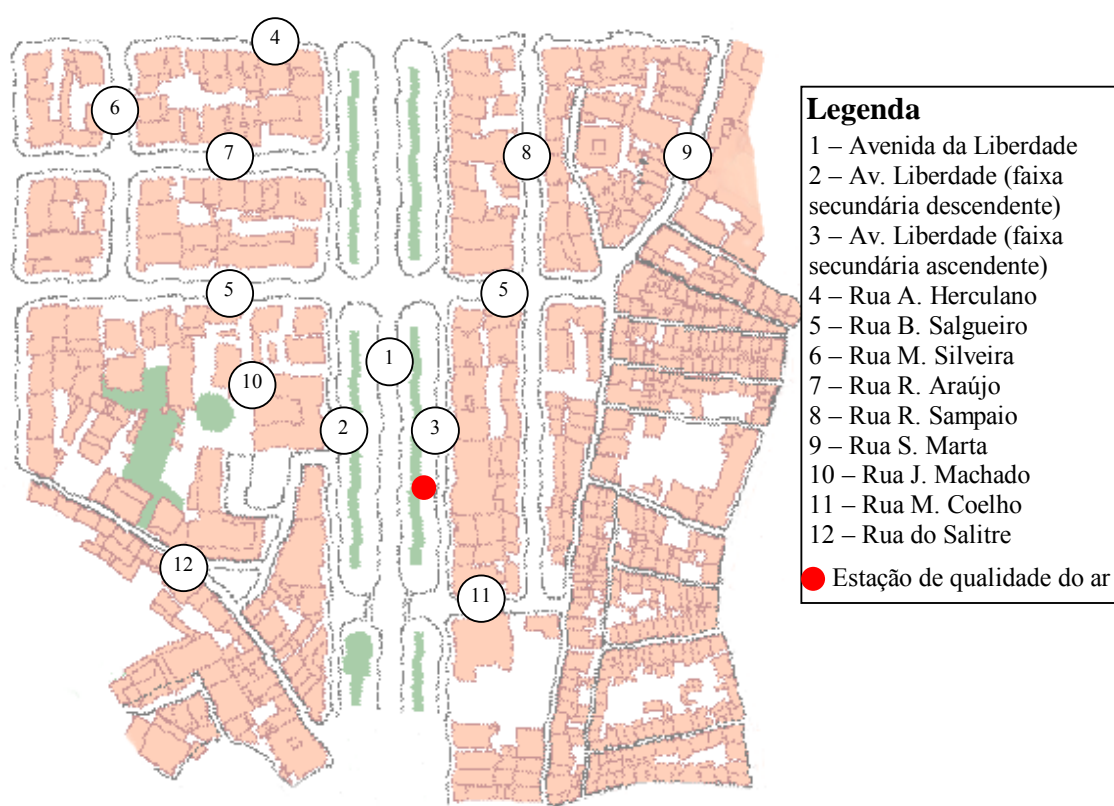


Figura V-6 – Localização das fontes de emissão consideradas no domínio de simulação e da estação de qualidade do ar (escala 1:4592) [url 1].

As concentrações horárias de CO foram, como no caso de estudo 2, estimadas com recurso ao modelo TREM. A figura V-7 apresenta a variação ao longo do período de simulação do fluxo de veículos resultante das contagens de tráfego e das emissões estimadas para a Avenida da Liberdade.

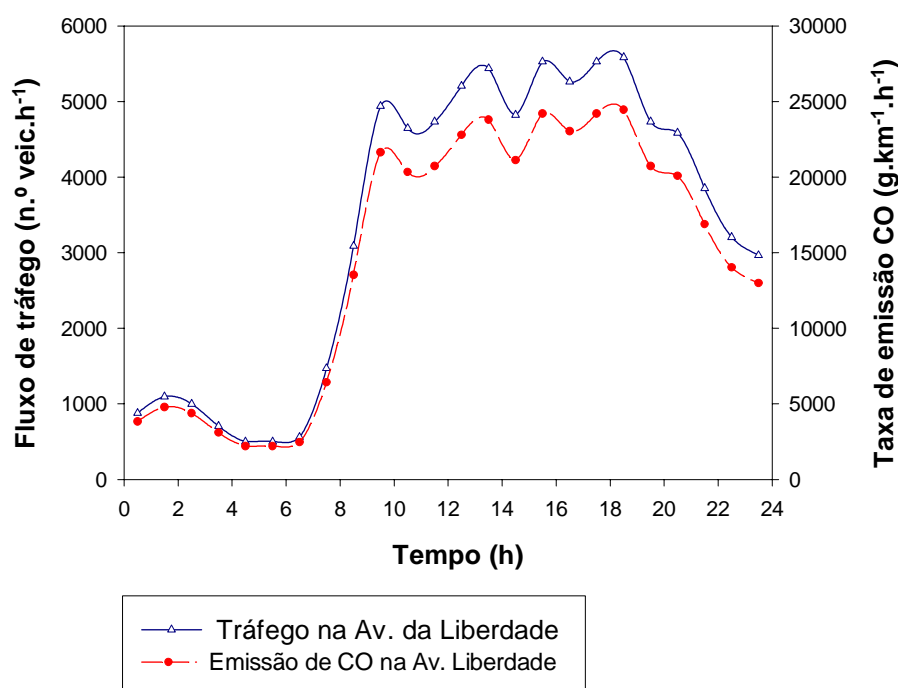


Figura V-7 – Evolução temporal dos valores médios horários de fluxo de tráfego (n.º veículos.h⁻¹) e das emissões rodoviárias de CO (kg.m⁻³.s⁻¹) estimadas pelo TREM para a Avenida da Liberdade, ao longo do dia de simulação.

As emissões estimadas verificaram um aumento acentuado a partir das 7 h e um decaimento igualmente significativo após as 21 h relacionados com a própria dinâmica do tráfego automóvel, que permite também explicar o aumento ocorrido durante a madrugada (das 0 às 3 h) e a diminuição durante o período de almoço (cerca das 14 h).

5.5. Dados de qualidade do ar

A informação horária de qualidade do ar foi obtida na estação de monitorização em contínuo localizada no corredor pedonal Este da Avenida da Liberdade, entre a Rua B. Salgueiro e a Rua M. J. Coelho (ver figuras V-6 e B-16).

O Decreto-Lei n.º 111/2002 de 16 de Abril³, relativo à gestão da qualidade do ar ambiente, define como valor-limite para a protecção da saúde humana um valor máximo diário de 10000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ para as médias de concentração de CO calculadas com base em períodos de oito horas consecutivas.

Na figura V-8 estão representados os valores médios de concentração para os períodos definidos (atente-se ao facto de o eixo das ordenadas se referir ao número do período e não à hora). A concentração média máxima obtida foi de 1063 $\mu\text{g.m}^{-3}$, correspondente ao período das 14 às 22 h (a concentração horária máxima medida foi de 1366 $\mu\text{g.m}^{-3}$ das 20 às 21 h), o que permite concluir que as concentrações de CO medidas durante o dia de simulação foram consideravelmente inferiores ao valor-limite definido na legislação.

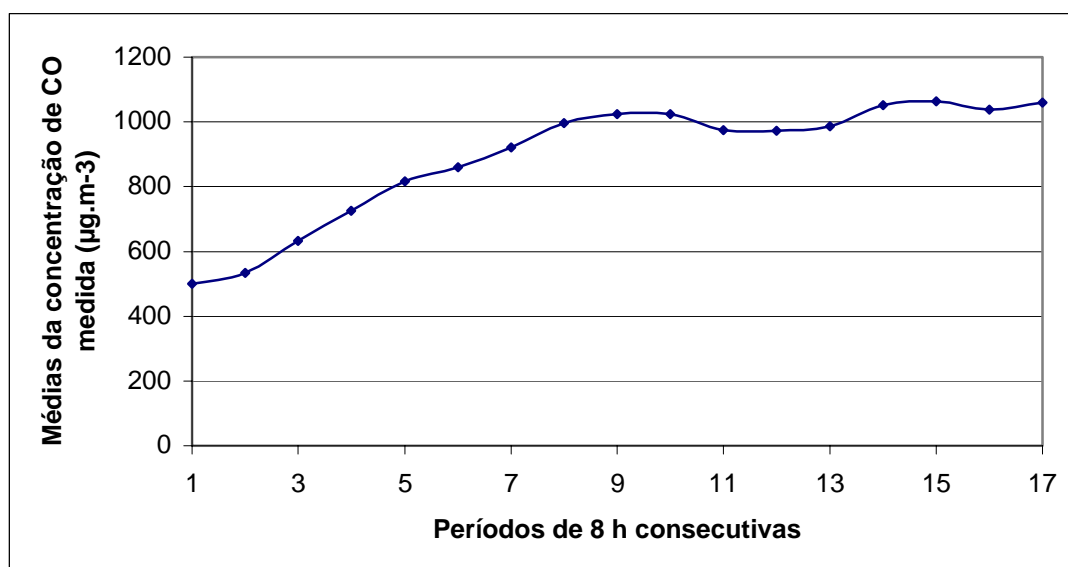


Figura V-8 – Médias octo-horárias das concentrações de CO medidas em períodos de oito horas consecutivas.

³ D.L. n.º 111/2002 de 16 de Abril: estabelece os valores limite das concentrações no ar ambiente do dióxido de enxofre, dióxido de azoto e óxidos de azoto, partículas em suspensão, chumbo, benzeno e monóxido de carbono, bem como as regras de gestão da qualidade do ar aplicáveis a esses poluentes, em execução do disposto nos artigos 4.º e 5.º do Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de Julho, transpondo para a ordem interna as Directivas Comunitárias n.ºs 1999/30/CE, do Conselho, de 22 de Abril, e 2000/69/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Novembro.

Tal como esperado, verifica-se um aumento gradual do valor das médias octo-horárias de concentração de CO medida ao longo do dia.

5.6. Apresentação e análise de resultados

Em média foram necessárias cerca de 190 iterações para a convergência do método iterativo em cada simulação, ao que correspondeu um total de aproximadamente 7 horas por hora simulada. Na figura V-9 está representado o campo de velocidades referente ao período das 11 às 12 h.

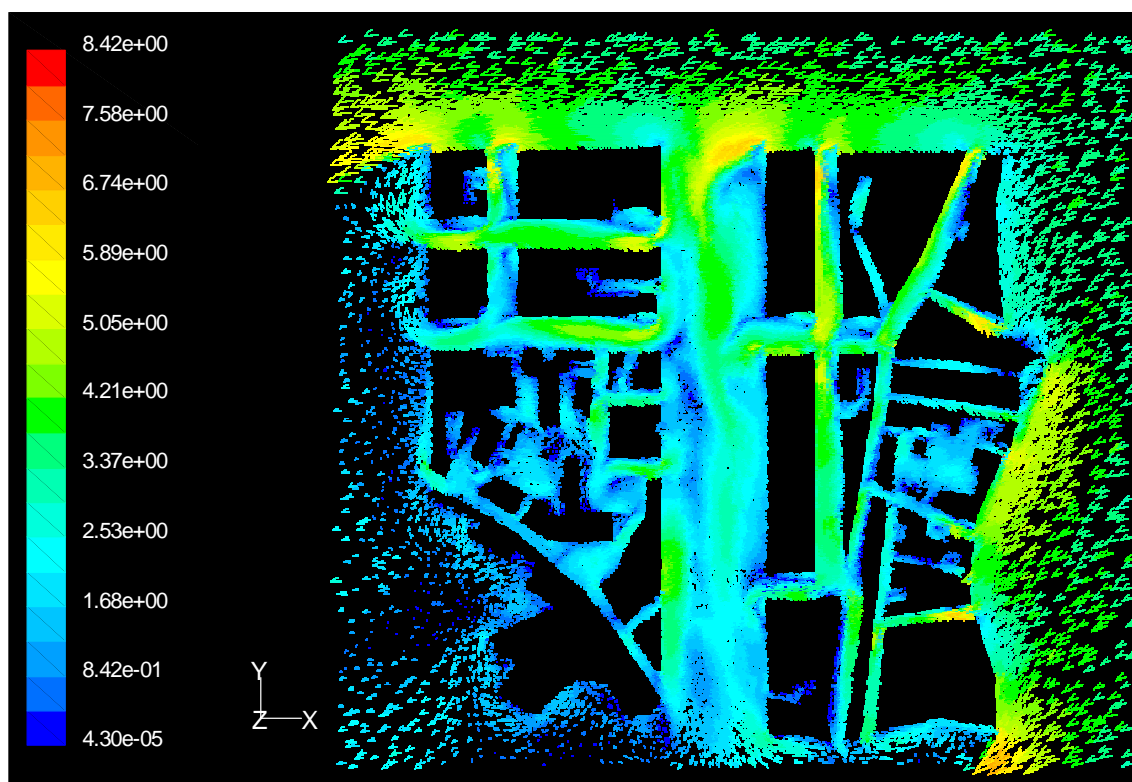


Figura V-9 – Representação num plano horizontal de altura 3 m dos vectores de velocidade (em m.s^{-1}) simulados pelo FLUENT e correspondentes ao período das 11 às 12 h.

Nesta imagem é visível o efeito dos edifícios sobre o campo de ventos, com gradientes acentuados de velocidade no eixo transversal das ruas. A figura V-10, que fornece uma imagem mais detalhada do campo vectorial de ventos, evidencia a capacidade do FLUENT na modelação das recirculações do escoamento em zonas localizadas na

“sombra” de edifícios, aspecto fundamental no âmbito do estudo da dispersão de poluentes atmosféricos em zonas urbanas porque é aí que a ocorrência das maiores concentrações é mais favorecida.

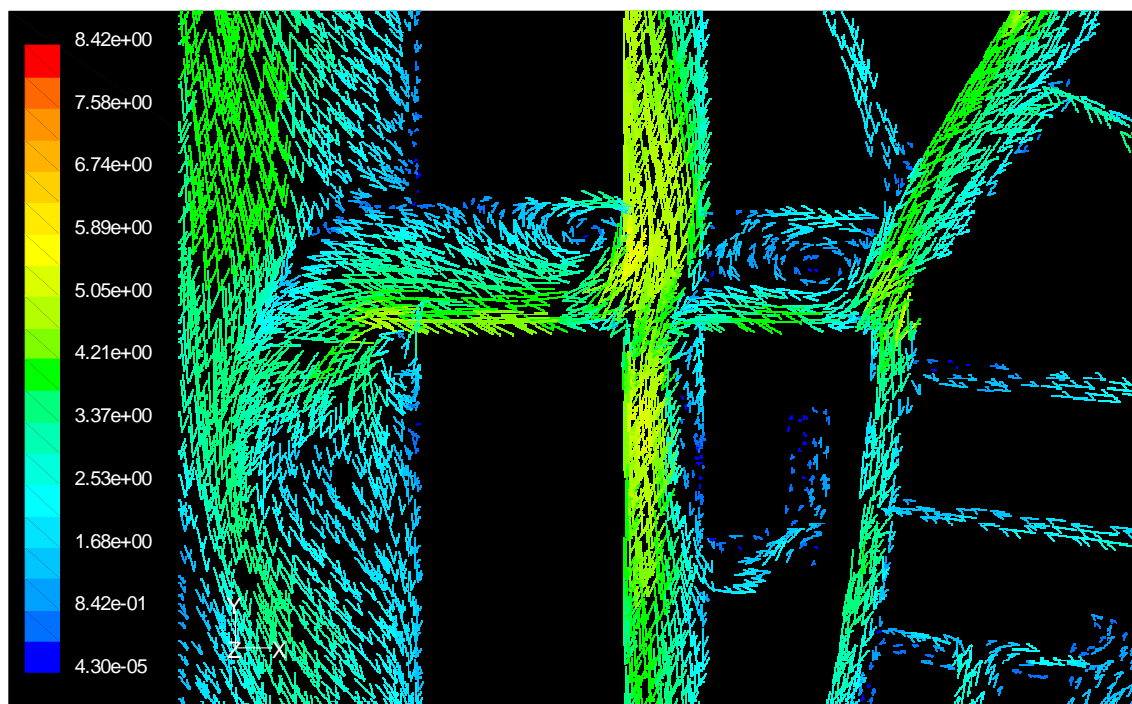


Figura V-10 – Pormenor dos vectores de velocidade (valores em m.s^{-1}) numa zona específica do domínio onde há a ocorrência de recirculações várias do escoamento.

Na figura V-11 são apresentadas as isopletas de concentração de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$) no mesmo período.

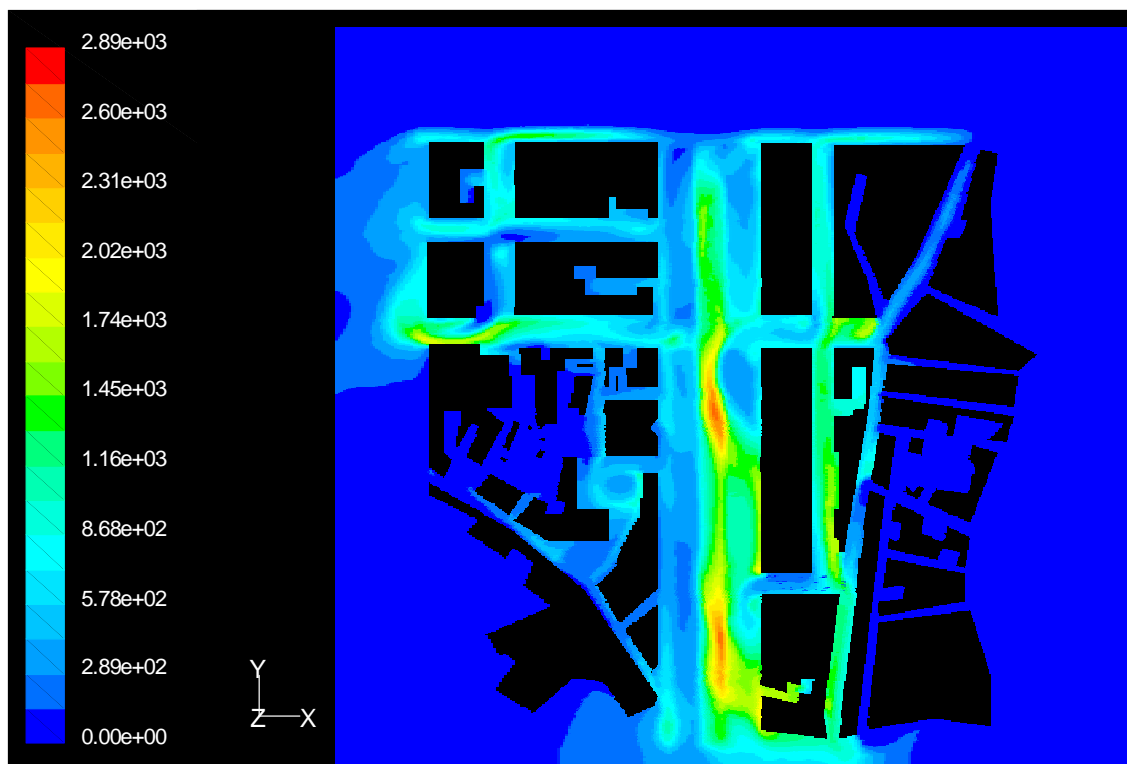


Figura V-11 – Representação num plano horizontal de altura 3 m do campo de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$) simulado pelo FLUENT (com a introdução das árvores) e correspondente ao período das 11 às 12 h.

Na figura anterior é possível distinguir a ocorrência de dois *hot-spots* pronunciados, localizados sobre a faixa central da Avenida. Este comportamento surge como resultado do efeito do escoamento proveniente das ruas transversais, representado vectorialmente na figura V-12. Nas figuras C-3 a C-26, em anexo, está representada a totalidade dos campos de concentração horária obtidos.

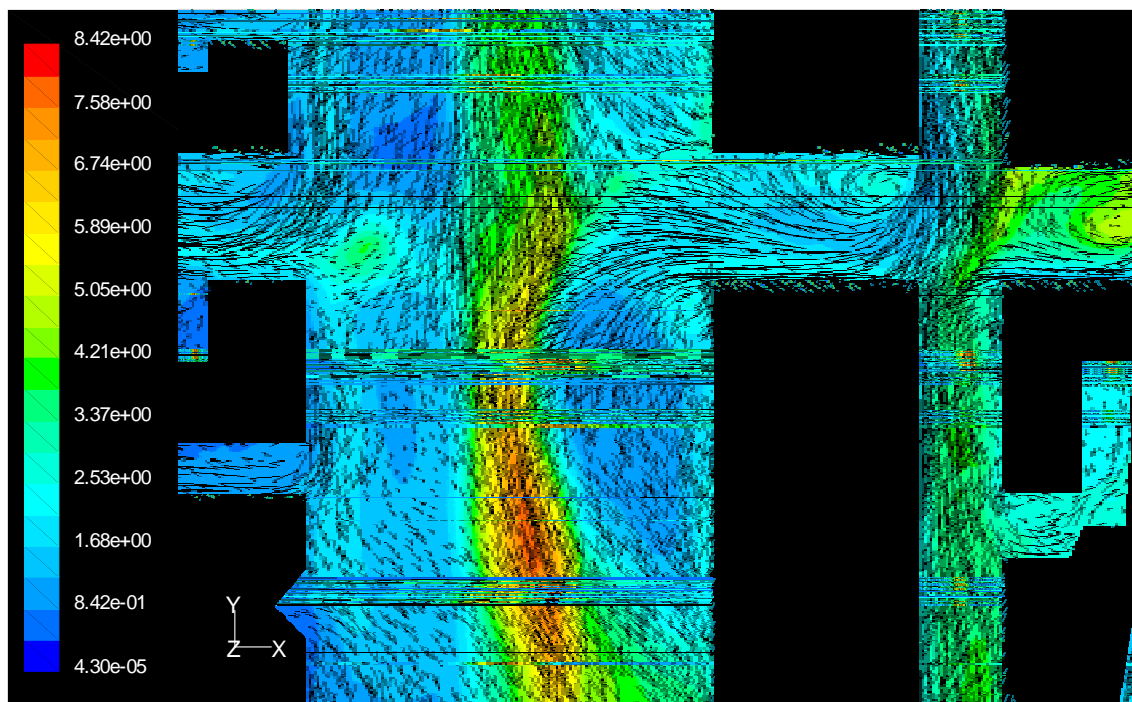


Figura V-12 – Campos horizontais de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$) e de ventos (m.s^{-1}) simulados pelo FLUENT e correspondentes ao período das 11 às 12 horas (plano horizontal de altura 1 m).

Na figura anterior é possível constatar a forma como os ventos de N/NE conduzem ao “arrastamento” do poluente para o lado Este da Avenida. Este escoamento de características singulares tem origem no efeito da configuração tridimensional dos edifícios que ladeiam esta artéria associado ao induzido pela presença das árvores. A magnitude das perturbações por estas exercidas sobre os campos de concentração e de ventos, e consequente efeito sobre a acumulação do poluente em *hot-spots*, foi avaliada através da realização de uma nova simulação para o período das 11 às 12 h, mantendo as condições de entrada anteriormente definidas mas sem a introdução dos blocos porosos.

Na figura V-13 estão representados os campos verticais de concentração e velocidade obtidos com e sem (imagem superior e inferior, respectivamente) a consideração da existência de árvores no domínio.

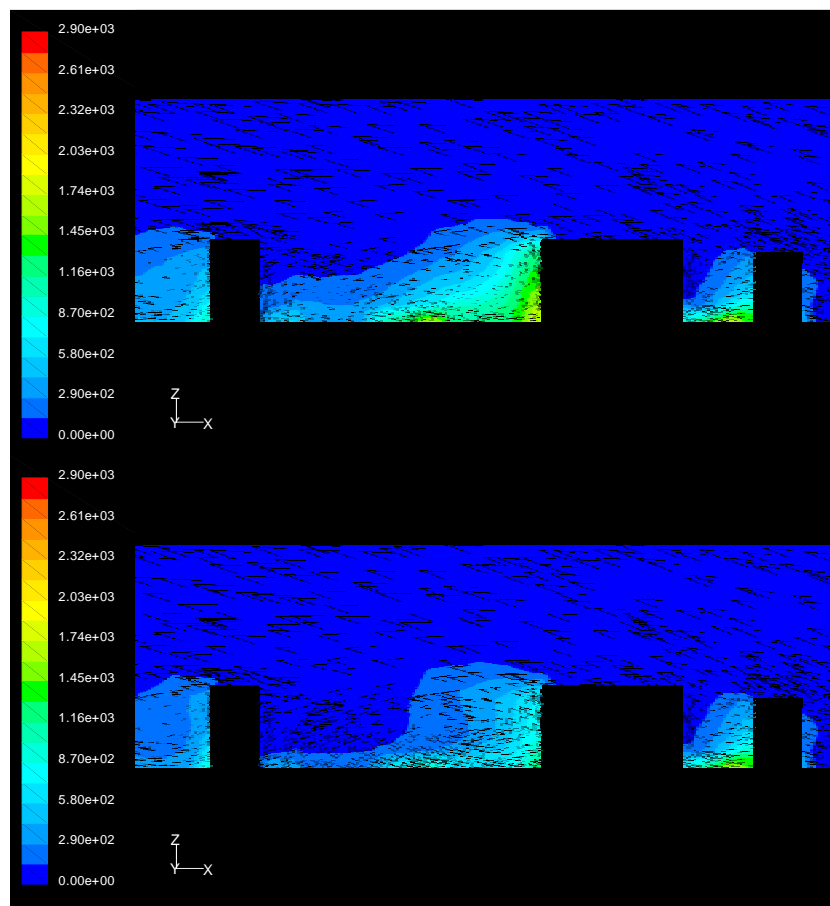


Figura V-13 – Comparação dos campos verticais de concentração e de velocidade na Avenida da Liberdade obtidos com e sem (imagem superior e inferior, respectivamente) a presença de árvores. A figura representa a simulação horária das 11 às 12 h e a escala de cores é referente aos valores de concentração (em $\mu\text{g.m}^{-3}$).

Na figura anterior é visível a formação de uma circulação que assume um movimento descendente nos edifícios a Oeste (à esquerda na imagem) e ascendente no lado oposto. As perturbações induzidas pela presença das árvores (imagem superior) associam-se a estas circulações, favorecendo a acumulação de poluente nos edifícios localizados a Este devido à diminuição da velocidade (também patente na representação exclusivamente do campo vertical de velocidade na figura C-27, em anexo). Na figura V-14 é possível avaliar de que modo a inexistência de árvores afectaria o campo de concentração anteriormente apresentado.

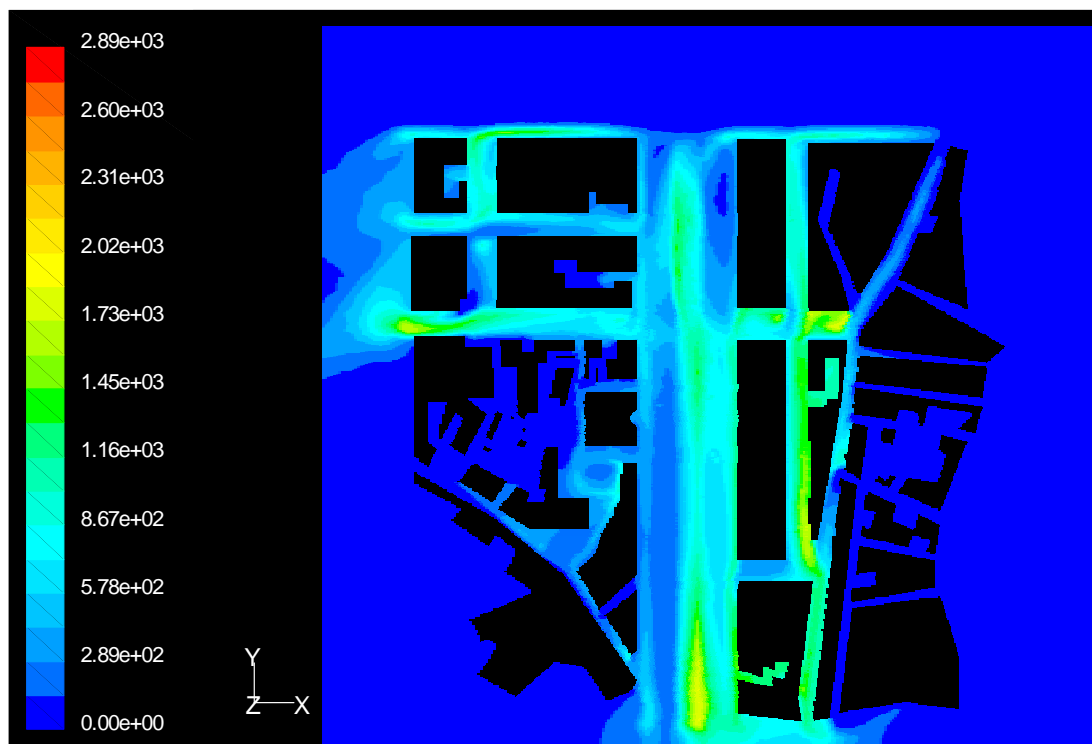


Figura V-14 – Representação num plano horizontal de altura 3 m do campo de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$) simulado pelo FLUENT sem a introdução de árvores e correspondente ao período das 11 às 12 h.

Da comparação das figuras V-11 e V-14 resulta que sem a introdução de árvores as concentrações de CO estimadas pelo modelo são significativamente inferiores, não se verificando a ocorrência dos *hot-spots* anteriormente identificados. Este comportamento foi observado para todo o período de simulação. Em particular na simulação horária das 11 às 12 h, o valor estimado considerando o efeito perturbador induzido pela vegetação foi de $1300 \mu\text{g.m}^{-3}$, consideravelmente mais próximo dos $1400 \mu\text{g.m}^{-3}$ medidos na estação de qualidade do ar do que o valor de $700 \mu\text{g.m}^{-3}$ estimado sem a introdução deste efeito.

Decorre desta análise que a existência de espaços verdes em zonas urbanas, ainda que promovendo a remoção de partículas em suspensão na atmosfera por deposição na folhagem e contribuindo para a diminuição do efeito da “ilha de calor”⁴ [Panagopoulos

⁴ A designação “ilha de calor” é atribuída ao fenómeno responsável pelo aumento da temperatura em centros urbanos relativamente às zonas limítrofes. A existência de árvores

et al., 2000; Raupach *et al.*, 2000], poderá exercer efeitos indesejados sobre a dispersão, como resultado do “encurralamento” dos poluentes em níveis baixos.

De modo a avaliar a incerteza associada à estimativa das concentrações de CO foi calculado o desvio máximo dos níveis de concentração medidos e calculados em períodos consecutivos de 8 horas, de acordo com o disposto no Decreto-Lei n.º 111/2002 de 16 de Abril. Os resultados foram representados graficamente na figura V-15.

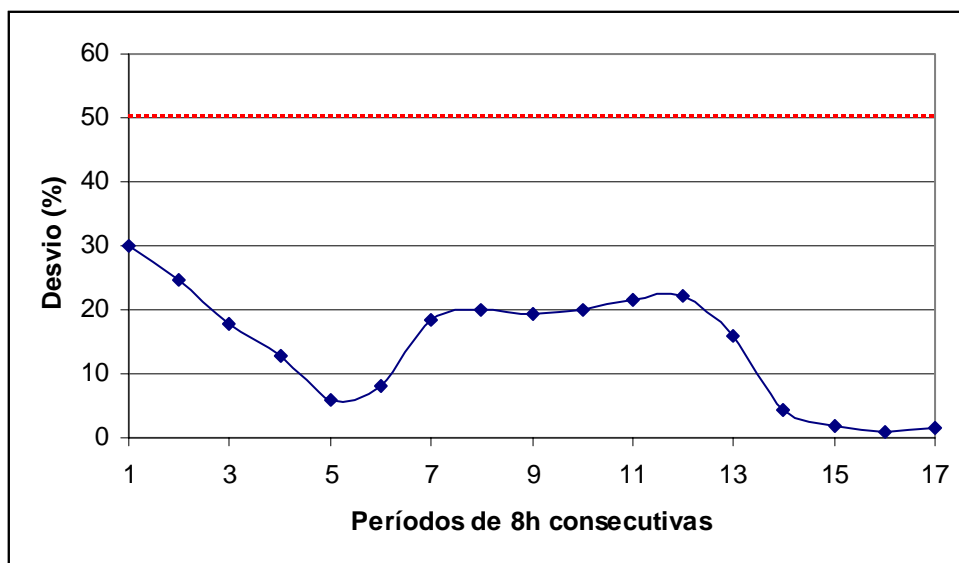


Figura V-15 – Desvios das médias octo-horárias das concentrações de CO estimadas pelo FLUENT relativamente às médias octo-horárias das concentrações medidas na estação de qualidade do ar. A linha a tracejado indica o valor máximo aceitável de incerteza para os valores estimados, de acordo com o disposto no D.L. 111/2002 de 16 de Abril.

O desvio máximo das médias octo-horárias das concentrações estimadas relativamente às médias octo-horárias das concentrações medidas foi de 30,1 %, referente ao período das 0 às 8 h, sendo significativamente inferior ao máximo de incerteza aceitável definido por lei de 50 %. O desvio médio calculado foi de 20,5 %. De modo a avaliar as possíveis causas na origem dos desvios encontrados, foi representada no gráfico da

favorece a redução da temperatura do ar devido à sombra gerada sobre as superfícies e a efeitos relacionados com a evapo-transpiração.

figura V-16 a variação ao longo do dia dos valores de velocidade do vento, de emissões, de concentração de CO simulados e dos medidos na estação de qualidade do ar da Avenida da Liberdade.

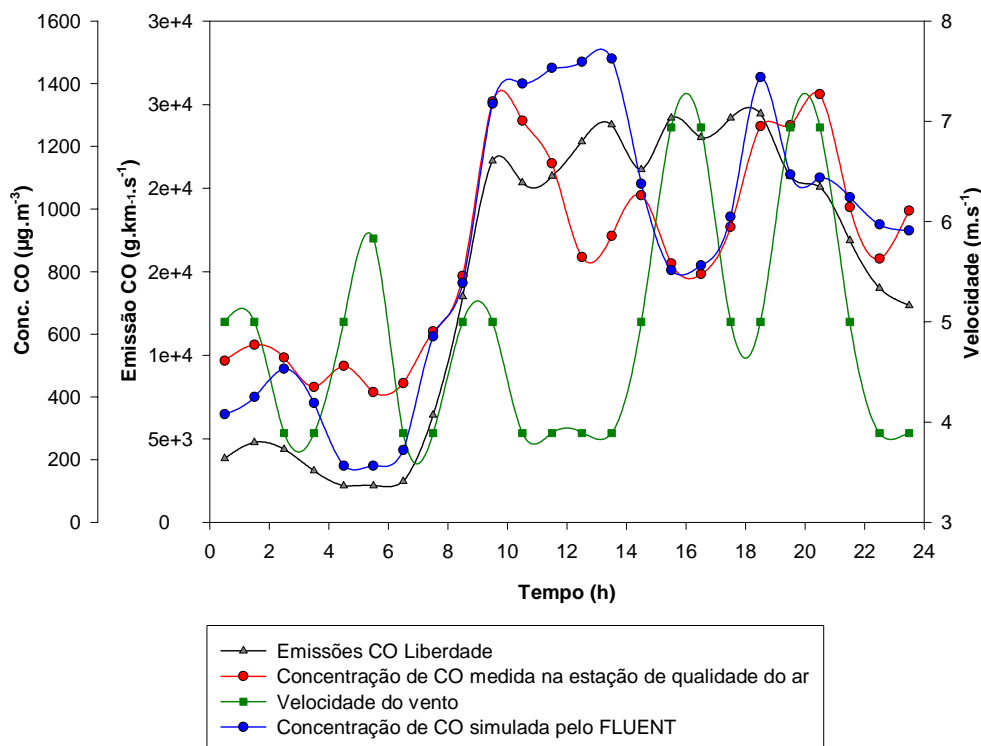


Figura V-16 – Gráfico comparativo da evolução, durante as 24 horas do período de simulação, dos valores médios horários de velocidade do vento (m.s^{-1}) à entrada do domínio, da emissão de CO ($\text{g.km}^{-1}.\text{s}^{-1}$) estimada pelo TREM para a Avenida da Liberdade, da concentração de CO ($\mu\text{g.m}^{-3}$) medida na estação de qualidade do ar e da concentração ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simulada pelo FLUENT.

A figura anterior permite estabelecer uma relação de causa/efeito entre os dados de entrada e saída, expressando a influência dos primeiros sobre os segundos. Os períodos das 4 às 7 h e das 9 às 15 h, este último em particular, são aqueles para os quais há um maior afastamento dos valores estimados relativamente às medições. Durante o período das 9 às 11 h, por exemplo, foi registada uma diminuição da concentração medida (de 1343 para 1282 $\mu\text{g.m}^{-3}$), podendo esta ser associada à diminuição das emissões (de $1,4 \times 10^{-7}$ para $1,3 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^3.\text{s}^{-1}$). Contudo, o aumento do valor da concentração simulada (de 1336 para 1400 $\mu\text{g.m}^{-3}$) mostra que, em termos de simulação numérica, terá exercido uma maior influência a diminuição da velocidade do vento (de 5 para

3,9 m.s⁻¹), e a consequente ocorrência de condições meteorológicas menos favoráveis à dispersão do poluente na área de estudo, do que a referida diminuição da taxa de emissão de CO. Já para o intervalo de tempo das 10 às 14 h a velocidade manteve-se, de uma forma geral, constante, as emissões aumentaram de modo acentuado e, no entanto, a concentração medida diminuiu significativamente, colocando-se assim a hipótese de ter existido uma sobrestimativa das emissões. Esta análise fundamenta, por isso, a importância da qualidade dos dados de entrada no rigor das concentrações estimadas, especialmente no que se refere à informação meteorológica e emissões.

6. CONCLUSÕES

O modelo FLUENT, testado no âmbito da presente dissertação, demonstrou possuir um conjunto de características que o tornam adequado para a simulação numérica do escoamento e dispersão de poluentes atmosféricos em ambiente urbano. Refiram-se, nomeadamente, a capacidade de construção tridimensional de sólidos assistida por suporte CAD, de geração de malhas de cálculo não-estruturadas e a disponibilização de diferentes códigos numéricos de modelação da turbulência. A sua aplicação no âmbito da avaliação da qualidade do ar está, contudo, escassamente documentada na literatura, o que justifica a importância da realização do tipo de estudos aqui apresentados.

Em escoamentos tridimensionais a resolução é obviamente limitada pelo custo computacional associado, que se traduz no tempo de cálculo necessário à convergência do método iterativo de resolução das equações de escoamento, e pelas restrições inerentes ao *hardware* utilizado, especialmente em termos de velocidade de processamento e memória RAM. Na construção e malhagem de estruturas não-regulares de elevada complexidade, comuns na arquitectura e planeamento urbanos, o pré-processador GAMBIT permitiu a obtenção de malhas não-estruturadas de resolução adequada às situações em estudo, garantindo um aumento significativo da flexibilidade na operação de malhagem de geometrias apresentando estas características. Com a aplicação desta técnica de discretização do domínio de cálculo, foram diminuídas muitas das restrições colocadas com a utilização de malhas regulares. Recorrendo à utilização deste tipo de células, a malhagem dos edifícios compreendidos no domínio de simulação da Avenida da Liberdade com a resolução conseguida através da utilização de células não-estruturadas tornar-se-ia extremamente “pesada” do ponto de vista computacional, pelo que o esforço envolvido na resolução de um problema com geometrias complexas constitui uma das mais consistentes motivações à utilização de malhas irregulares.

Tal como ficou patente na intercomparação realizada com o modelo VADIS para o domínio de cálculo da Baixa Pombalina, as características das células de cálculo são um factor determinante na qualidade dos resultados obtidos. O tipo de malha utilizada fica,

contudo, ao critério do modelador, porquanto se a resolução depende unicamente das capacidades computacionais (o erro cometido com a discretização do domínio é inversamente proporcional ao número de células), não existe uma regra quanto ao tipo (forma das células) que garante o resultado mais próximo da realidade.

O desenvolvimento de zonas de recirculação e esteiras junto a obstáculos confere uma pronunciada heterogeneidade à atmosfera urbana. A capacidade de escoamento e dispersão dos poluentes na CLA resulta da conjugação dos efeitos mecânicos, determinados pelas características físicas do terreno, e termodinâmicos, induzidos pelo ciclo térmico diário. Neste sentido, ficou expressa pelo conjunto de simulações realizadas a influência da configuração e distribuição dos edifícios sobre o campo tridimensional de concentrações. Em áreas urbanas, o escoamento típico de *street canyon* origina a acumulação dos poluentes em *hot-spots*. Nas situações estudadas, estes locais de concentração máxima não coincidem, contudo, com a localização da estação de qualidade do ar, pondo em causa a representatividade dos valores aí medidos. Por outro lado, a presença de árvores é também um factor da maior importância neste contexto, pelo facto de exercer igualmente um efeito pronunciado sobre o comportamento do escoamento. Não obstante a importante componente ambiental, a vários níveis, dos espaços verdes em zonas citadinas, o tipo, número e distribuição destas áreas deve obedecer a critérios específicos definidos com base na avaliação, *a priori*, dos eventuais efeitos sobre a qualidade do ar local.

Ainda que relativamente à simulação física em túnel-de-vento a modelação numérica apresente a vantagem de permitir a obtenção de resultados de uma forma mais expedita, o tempo e esforço computacionais envolvidos no processamento de problemas de qualidade do ar, em especial com recurso a modelos CFD, constitui ainda um obstáculo à realização de simulações em tempo real. Assim, modelos com as características do FLUENT deverão ter um papel preponderante ao nível da investigação dos fenómenos envolvidos, dada a qualidade e resolução dos resultados obtidos, assumindo um papel importante na aquisição da informação de entrada necessária à utilização de modelos operacionais caracterizados por formulações matemáticas de base mais simples.

Dada a importância de algumas das questões suscitadas com a realização do presente trabalho, nomeadamente ao nível do estudo e avaliação das perturbações exercidas no escoamento pela colocação de barreiras porosas, será dada continuidade à aplicação do FLUENT na simulação dos campos de vento e de concentração de poluentes atmosféricos em áreas problemáticas do ponto de vista da qualidade do ar. De forma complementar, este modelo constituirá uma ferramenta de suporte ao desenvolvimento de um modelo numérico de simulação da dispersão na atmosfera de uma nuvem de retardante químico resultante da largada aérea em situações de combate a incêndios florestais. Esta ferramenta deverá fornecer de modo operacional o padrão de deposição ao nível do solo com base nas características do avião, nas condições de voo e meteorológicas e no caudal de emissão e propriedades reológicas do produto. Pretende-se, desta forma, contribuir para a optimização desta operação, garantindo a deposição do produto no local e quantidade adequados ao retardamento da frente de incêndio, e para o aumento das condições de segurança no voo. Em última análise, consolidar-se-á a importância da largada aérea de retardantes químicos como técnica de apoio às operações desencadeadas no solo, em especial em Portugal, onde este é ainda um recurso pouco valorizado.

A obtenção expedita de resultados mais rigorosos na representação numérica dos fenómenos envolvidos no escoamento atmosférico continuará seguramente a constituir o maior estímulo ao desenvolvimento de ferramentas de cálculo mais evoluídas, com a certeza de que a vontade de conhecer e compreender estará sempre um passo adiante de quaisquer técnicas de simulação numérica, não fosse este o verdadeiro motor do conhecimento.

Caberá alguma vez a realidade na interpretação binária de um computador?

7. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J.A.F. (1988) *Métodos de Análise da Distribuição de Ar em Recintos Climatizados*; Tese de Doutoramento; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Porto, Portugal; 198 pp..
- BARROS, N. e BORREGO, C. (1995) *Influence of Coastal Breezes on the Photochemical Production Over the Lisbon Region*; Air Pollution III; N. Moussiopoulos, H. Power e C. Brebbia (Eds.); Computational Mechanics Publ.; Southampton, UK; pp. 67-74.
- BEÇA, A.C. (1986) *Modelo Numérico de Dispersão Turbulenta de Poluentes na Atmosfera*; Tese de Mestrado em Engenharia Térmica; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Porto, Portugal; 180pp..
- BORREGO, C. (1980) *Measurements and Predictions of Complex Turbulent Flows, Hot Wire Techniques: Conditional Sampling and Intermittency*; Lecture Series 1980-3; Von Karman Institute for Fluid Dynamics; Rhode Saint Genese, Belgium; 101 pp..
- BORREGO, C. (1989) *Modelização da Qualidade do Ar: Aplicação do Modelo Lagrangeano de Dispersão de Poluentes na Atmosfera*; Provas de Agregação; Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- BORREGO, C. (1994) *Poluição Atmosférica I*; Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro; Aveiro, Portugal; 295 pp..
- BORREGO, C. e MARTINS J.M. (1994) *Étude de la Diffusion Atmospherique des Risques Industriels Majeurs*; MISTRAL Project Final Report (CEC Contract EV5V-CT91-0041); AMB-QA-(3)/94; Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro; Aveiro, Portugal.
- BORREGO, C.; MARTINS, J.M.; TOMÉ, M.; CARVALHO, A.; BARROS, N. e PINTO, C. (2000a) *Wind Tunnel Validation of VADIS, a Numerical Model Simulating Flow and Dispersion Around Building Sets*; Proceedings of the EUROTRAC Symposium 2000, Springer-Verlag; Germany; 278 pp.; ISBN: 3-540-41983-7.
- BORREGO, C.; TCHEPEL, O.; BARROS, N. e MIRANDA, A.I. (2000b) *Impact of Road Traffic Emissions on Air Quality of the Lisbon Region*; Atmospheric Environment 34, pp. 4683-4690.
- BORREGO, C.; COSTA, M.J.; MARTINS, J.M.; PINTO, C.; CARVALHO, A.; TOMÉ, M.; GRÁCIO, J.; COSTA, V. e SILVA, F. (2000c) *O Escoamento Atmosférico e a Dispersão de Poluentes em Ambiente Urbano: Desenvolvimento de uma Metodologia a Aplicar em Geometrias Complexas*; Relatório Final do Projecto EDIPU (PRAXIS/3/3.1/CEG/2647/95); Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro; Aveiro, Portugal; 64 pp..

BORREGO, C.; MIRANDA, A.I.; TCHEPEL, O.; COSTA, A.M.; AMORIM, J.H. e MAGALHÃES, S. (2002a) *Development of an Integrated Air Quality Management System for Urban Areas*; Proceedings of the EUROTRAC 2 Symposium 2002; 11-15th March 2002; Garmish-Partenkirchen, Germany.

BORREGO, C.; MIRANDA, A.I.; COSTA, A.M.; TCHEPEL, O.; AMORIM, J.H. e MARTINS, H. (2002b) *Air Quality Modelling in European Cities: a Local Scale Perspective*; Proceedings of the 8th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes; Sofia, Bulgaria; pp. 244 - 248.

BORREGO, C.; JANKO, J.; TCHEPEL, O.; SALMIM, L.; AMORIM, J.H. e COSTA, A.M. (2002c) *Integrated Modelling of Road Traffic Emissions: Application to Lisbon Air Quality Management*; to be presented on the 1st International NAISO Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering (ITEE 2003); Gdansk, Poland; 24-27th June 2003.

BRUUN, H.H. (1995) *Hot-Wire Anemometry – Principles and Signal Analysis*; Oxford University Press; New York, USA; 507 pp.; ISBN: 0198563426.

COST 319 (1998) *Instantaneous Emission Data and Their Use in Estimating Passenger Car Emissions*; Technical University of Graz; Austria.

COSTA, M.J.M. (1996) *Simulação Física do Escoamento Atmosférico e Dispersão sobre Colinas Bidimensionais*; Dissertação de Doutoramento em Ciências Aplicadas ao Ambiente; Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento; Aveiro, Portugal; 177 pp..

COSTA, V.A.F. (1995) *Modelação Numérica de Escoamentos Tridimensionais Incompressíveis Através de um Método de Elementos Finitos Baseado em Volumes de Controlo*; Dissertação de Doutoramento em Ciências da Engenharia Mecânica; Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica; Coimbra, Portugal; 296 pp..

DGTT (2000) *Mobilidade e Transportes na AML – 2000*; Direcção-Geral de Transportes Terrestres, Delegação de Transportes de Lisboa; Lisboa, Portugal.

DWIA (2002) *Guided Tour on Wind Energy*; Danish Wind Industry Association (disponível em [url 6](#)).

EC (2000) *Design for Living - the European City of Tomorrow*; EUR 19381; European Commission; Energy, Environment and Sustainable Development; Belgium.

ENGLAND, A.H.; BAKER, C.J. e SAUNDERSON, S.E.T. (2000) A Dynamic Analysis of Windthrow of Trees; Forestry, Vol. 73, issue 3, August 2000; pp. 225-238; ISSN: 0015-752X.

FISCHENICH, C. (2000) *Resistance Due to Vegetation*; EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN-EMRRP-SR-07), U.S. Army Engineer Research and Development Center; Vicksburg, USA.

FLUENT (2001a) *FLUENT 6.0 User's Manual*; Fluent Inc.; Lebanon.

FLUENT (2001b) *GAMBIT 2.0 User's Manual*; Fluent Inc.; Lebanon.

FRIEDRICH M. (1998) *A Multi-Modal Transport Model for Integrated Planning*; Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research; Antwerp, Belgium.

HUBER, A.H.; FREEMAN, M.; RIDA, S.; KUEHLERT, K. e BISH, E. (2001) *Development and Applications of CFD in Support of Air Quality Studies of Roadway and Building Microenvironments*; Proceedings of the 94th A&WMA Annual Conference; Orlando, Florida; 24-28th June 2001.

INE (2001) *Censos 2001 - Recenseamento Geral da População e Habitação*; Instituto Nacional de Estatística; Lisboa, Portugal.

IRWIN, H. (1981) The Design of Spires for Wind Simulation; *Journal of Wind Engineering and Industrial*, vol. 7; pp. 361-366.

KASTNER-KLEIN, P.; BERKOWICZ, R. e PLATE, E. J. (1998) *Modelling of Vehicle Induced Turbulence in Air Pollution Studies for Streets*; Paper presented at the 5th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes; Rhodes, Greece; accepted in Int. Journal of Environment and Pollution.

KASTNER-KLEIN, P.; FEDOROVICH, E.; SINI, J.F. e MESTAYER, P.G. (1999) *Experimental and Numerical Verification of Similarity Concept for Diffusion of Car Exhaust Gases in Urban Street Canyons*; Submitted to the Journal of Environmental Monitoring and Assessment.

LAUNDER, B. E. e SPALDING, D. B. (1972) *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*; Academic Press; London, England; ISBN: 0124380506.

LEITL, B. e SCHATZMANN, M. (2001) *Basic Demands on Boundary Layer Modelling and Quality Assurance in Wind Tunnel Modelling with Respect to Microscale Flow and Dispersion Studies*; Proceedings of the International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena (PHYSMOD); 3-5th September; Hamburg University; Germany.

LESIEUR, M. (1990) *Turbulence in Fluids - Stochastic and Numerical Modelling*; Second revised edition; Fluid Mechanics and its Applications, vol.1; Kluwer Academic Publishers; Netherlands; 412 pp.; ISBN 0-7923-0645-7.

LOPES, A.M.G. (1993) *Modelação Numérica e Experimental do Escoamento Turbulento Tridimensional em Topografia Complexa: Aplicação ao Caso de um Desfiladeiro*; Dissertação de Doutoramento em Ciências da Engenharia Mecânica (Aerodinâmica); Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica; Coimbra, Portugal; 320 pp..

LOWE, S.A.; MUELLER, J.A. e MATYSTIK, W. (1999) *Applicability of the FLUENT Computational Fluid Dynamics Package to Air Quality Problems*; Air Pollution VII, 7th International Conference on Air Pollution; C.A. Brebbia, M. Jacobson e H. Power (Eds.); WIT Press; pp. 521-530; Southampton, UK; ISBN: 1853126934.

MARTINS, J.M. (1998) *Dispersão de Poluentes Atmosféricos na Esteira de um Obstáculo em Condições de Vento Fraco*; Dissertação de Doutoramento em Ciências Aplicadas ao Ambiente; Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento; Aveiro, Portugal; 196 pp..

MARTINS, J.M. e BORREGO, C. (1998) *Describing the Dispersion of Pollutants Near Buildings Under Low Wind Speed Conditions: Real Scale and Numerical Results*; Envirosoft 98 – Development and application of computer techniques to environmental studies; WIT; Las Vegas, USA.

MAYER, H.; NAUSTEIN, Ch. e MATZARAKIS, A. (1999) *Urban Air Pollution Caused by Motor-traffic*; Air Pollution VII, 7th International Conference on Air Pollution; C.A. Brebbia, M. Jacobson e H. Power (Eds.); WIT Press; pp. 251-260; Southampton, UK; ISBN: 1853126934.

MEET (1999) *Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption*; SE/491/98; Transport Research Laboratory; UK.

MESTAYER, P.G. (1998) *Urban Scale Models*; Air Pollution – European Aspects; J. Fenger, O. Hectel e F. Palmgren (Eds.); Environmental Pollution, vol. 1; Kluwer Academic Publishers, Netherlands; pp. 197-221; ISBN: 0-7923-5502-4.

PANAGOPOULOS, I.; KARAYANNIS, A.; KERAMIDA, E.; NIKOLOPOULOU, M. e DIMOUDI, A. (2000) *Turbulent Dispersion and Prediction of Wind Circulation Patterns in an Urban Environment – The Effect of Vegetation*; Second Internet Conference on Process Safety; 20-24th March 2000 (disponível em [url 4](#)).

PATANKAR, S.V. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*; Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences; W.J. Minkowycz and E.M. Sparrow (Eds.); Hemisphere Publishing Corporation, McGraw-Hill Book Company, USA; 197 pp.; ISBN: 0-07-048740-5.

PLATE, E.J. (1995) *Urban Climates and Urban Climate Modelling: An Introduction*; Wind Climate in Cities, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Wind Climate in Cities; J.E. Cermak, A.G. Davenport, E.J. Plate e X.V. Domingos (Eds.); NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences vol. 277; Kluwer Academic Publishers; Netherlands; pp. 23-39; ISBN: 0-7923-3202-4.

RAUPACH, M.R.; LEYS, J.F.; WOODS, N.; DORR, G. e CLEUGH, H.A. (2000) *Modelling the Effects of Riparian Vegetation on Spray Drift and Dust: The Role of Local Protection*; Technical Report 29/00; August 2000; CSIRO Land and Water.

SCHATZMANN, M.; LEITL, B.; AUBRUN, S. e PASCHEKE, F. (2001) *The Future Role of Physical Modelling in the Investigation of Micro-Scale Flow and Dispersion Processes*; International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena (PHYSMOD); 3-5th September 2001; Hamburg University; Germany.

SCHORLING, M. (1987) *Lagrangian Simulation of Neutral and Heavy Gases in Complex Terrain and Streets*; Proceedings of the International Conference on Energy Transformations and Interaction with Smoke and Mesoscale Atmospheric Processes; Lausanne, Switzerland.

SNYDER, W.H. (1981) *Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion*; EPA Report 600/8-81-009; Meteorology and Assessment Division, Environmental Sciences Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency; USA; 185 pp..

STULL, R.B. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*; Atmospheric Sciences Library; Kluwer Academic Publishers; Netherlands; 666 pp.; ISBN: 90-277-2768-6.

TCHEPEL, O.; COSTA, A.M.; AMORIM, J.H.; MIRANDA, A. e BORREGO, C. (2002) *Transport Emission Model and Dispersion Study for Lisbon Air Quality at Local Scale*; 11th International Symposium of Transport and Air Pollution; 19-21st June 2002; Graz, Austria; pp. 109 – 116.

TREM (2002) *Transport Emission Model for Line Sources - Methodology Description*; Technical Report D04.1. of EC SUTRA Project (EVK4-CT-1999-00013).

VADIS (2002) *VADIS Street Canyon Model - Methodology Description*; Technical Report D04.3. of EC SUTRA Project (EVK4-CT-1999-00013).

WHO (1999) *Guidelines for air quality*; World Health Organisation; Geneva.

ZANNETTI, P. (1990) *Air Pollution Modelling: Theories, Computational Methods and Available Software*; Van Nostrand Reinhold; New York, USA; 444 pp.; ISBN:1-85312-100-2.

Endereços na *Internet*

url 1: <http://dmpel.ambisig.com>

url 2: <http://www.ess.co.at/SUTRA/>

url 3: <http://www.iambiente.pt>

url 4: <http://www.safetynet.de>

url 5: <http://snig.igeo.pt>

url 6: <http://www.windpower.org>

ANEXOS

Anexo A - Descrição do modelo numérico FLUENT

Anexo B - Validação do modelo FLUENT

Caso de Estudo 1: Ensaios experimentais em túnel-de-vento

Caso de Estudo 2: Baixa Pombalina

Anexo C - Aplicação do FLUENT à Avenida da Liberdade

Anexo A - Descrição do modelo numérico FLUENT

```

PROGRAMA Perfil_Ventos
Este programa gera um ficheiro profile de campo
de ventos, para inicialização do Modelo FLUENT.
Jorge M. Amorim, 4/2002

Qual o nome do ficheiro de resultados (*.prof)?
Lisboa_Baixa_8/7/97_20h.prof

altura do dominio, em m ?
50

largura do dominio, em m ?
600

Qual a inclinacao (angulo de desvio) do dominio relativamente ao Norte (graus)?
344

Qual a velocidade do vento a entrada do dominio (m.s-1)?
3.7

Qual a direccao (meteorologica) do vento a entrada do dominio (graus)?
301.7

Qual o valor de p (coef urbano: p=0.22)?
0.22

Qual a altura (de referencia) de medicao dos parametros meteorologicos
usualmente, z_ref=10m (m)?
10

Simulacao terminada
Press any key to continue_

```

Figura A-1 – Janela de interacção com o utilizador no programa “Perfil_Ventos”.

File Edit Format View Help

((PerfilVentos_20h point 38))

Cx	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cy	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Cz	0.000000	0.241477	0.280613	0.326091	0.378839	0.440353	0.511719	0.594652							
U	2.297957	2.670380	3.103159	3.605077	4.160102	4.809643	5.658849	6.739460							
V	1.096253	1.156966	1.195835	1.234010	1.277536	1.320456	1.364818	1.410670							
	3.222523	3.330787	3.442689	3.558349	3.677896	3.799909	3.924419	4.051573							
	0.000000	-1.271499	-1.314206	-1.358358	-1.403994	-1.451162	-1.499926	-1.550307							
	-2.087233	-2.137376	-2.129856	-2.104770	-2.162201	-2.462234	-2.544915	-2.630455							
	-3.541509	-3.660489	-3.783467	-3.910577	-4.041896	-4.180108									

Figura A-2 – Exemplo de um ficheiro *profile* gerado pelo programa “Perfil_Ventos”.

calculos_intermedios - Notepad

File Edit Format View Help

FICHEIRO DE CALCULOS INTERMEDIOS

Altura de referência: z_ref= 10m
 velocidade do vento à entrada do domínio: v= 3.90m.s-1
 Direcção do vento: dir=301.7graus
 Ângulo de inclinação do domínio relativamente à vertical: ang_doma=344.0graus
 p=22
 Direcção do vento corrigida: dir_corr=317.7graus

z(t)	wz(t)	uw(t)	vw(t)	i
0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0
2.414774E-01	1.719095	1.156966	-1.271489	1
2.806129E-01	1.776840	1.195855	-1.314206	2
3.200000E-01	1.836531	1.236010	-1.358319	3
3.789999E-01	1.898235	1.277536	-1.403994	4
4.402527E-01	1.962008	1.320456	-1.451162	5
5.117192E-01	2.027924	1.364818	-1.499926	6
5.946518E-01	2.096054	1.410670	-1.550307	7
6.810250E-01	2.166473	1.458083	-1.602391	8
7.710171E-01	2.239258	1.507048	-1.656225	9
8.638594E-01	2.314488	1.557679	-1.711867	10
9.594793	2.392245	1.610011	-1.769279	11
1.058137	2.472613	1.664101	-1.828513	12
1.164363	2.555685	1.720058	-1.889626	13
1.270188	2.641346	1.777793	-1.951770	14
1.377475	2.730292	1.837320	-2.014809	15
1.487957	2.822018	1.898251	-2.078753	16
1.600380	2.916827	1.961081	-2.153736	17
1.705159	3.014821	2.026012	-2.229816	18
1.809077	3.116107	2.093178	-2.306470	19
1.905002	3.220796	2.162635	-2.382201	20
1.999643	3.329001	2.234459	-2.462234	21
2.095849	3.440843	2.311750	-2.544933	22
2.193960	3.556441	2.392529	-2.630835	23
2.294104	3.675923	2.475982	-2.718828	24
2.396069	3.799420	2.557056	-2.809107	25
2.500350	3.927065	2.642985	-2.904580	26
2.606170	4.058999	2.731756	-3.002162	27
2.713524	4.195365	2.823552	-3.103023	28
2.822407	4.336313	2.918392	-3.207272	29
2.932812	4.481996	3.016438	-3.315024	30
3.044791	4.632573	3.117779	-3.426395	31
3.158390	4.788208	3.222523	-3.541509	32
3.273641	4.949073	3.330787	-3.660489	33
3.390500	5.115343	3.442680	-3.783467	34
3.508999	5.287198	3.558349	-3.910577	35
3.629150	5.464827	3.677896	-4.041916	36
3.750000	5.648670	3.799929	-4.177508	37

Figura A-3 – Exemplo de um ficheiro de cálculos intermédios gerado pelo programa “Perfil_Ventos”.

Anexo B - Validação do modelo FLUENT

Caso de Estudo 1: Ensaio experimentais em túnel-de-vento

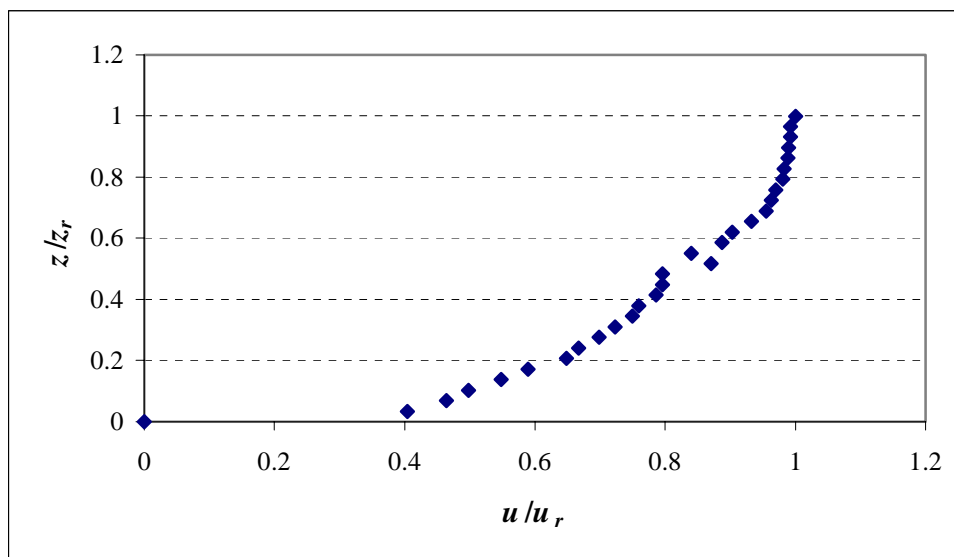


Figura B-1 – Perfil adimensional de velocidades obtido com o anemómetro de fio-quente simples a 10 cm do início da secção-de-ensaio.

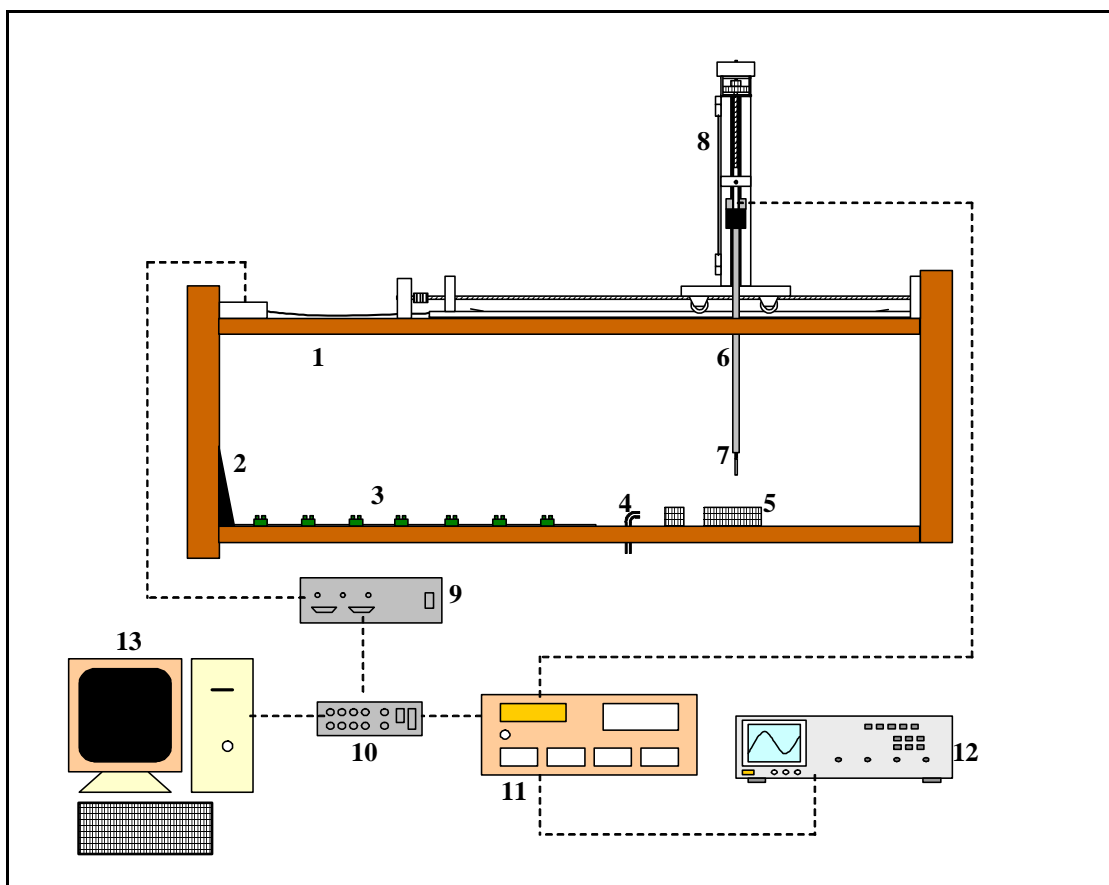


Figura B-2 – Esquema da montagem do equipamento usado na medição do campo de velocidades do escoamento.

Onde,

- 1 - Secção-de-ensaio do túnel-de-vento;
- 2 - *Spikes*;
- 3 - Elementos de rugosidade (blocos de “Lego”);
- 4 - Chaminé (utilizada para a introdução do gás traçador na medição da concentração pelo sistema FID);
- 5 - Obstáculos;
- 6 - Suporte da sonda;
- 7 - Sonda de fio-quente;
- 8 - Sistema de posicionamento automático;
- 9 - *Multiplexer* de ligação à placa de aquisição de dados;
- 10 - Módulo controlador do posicionador;
- 11 - Componente electrónica do anemómetro de fio-quente;
- 12 - Osciloscópio;
- 13 - Computador com placa de aquisição de dados e *software* de controlo do posicionador e de ligação à componente electrónica do anemómetro para visualização e registo dos valores das velocidades.

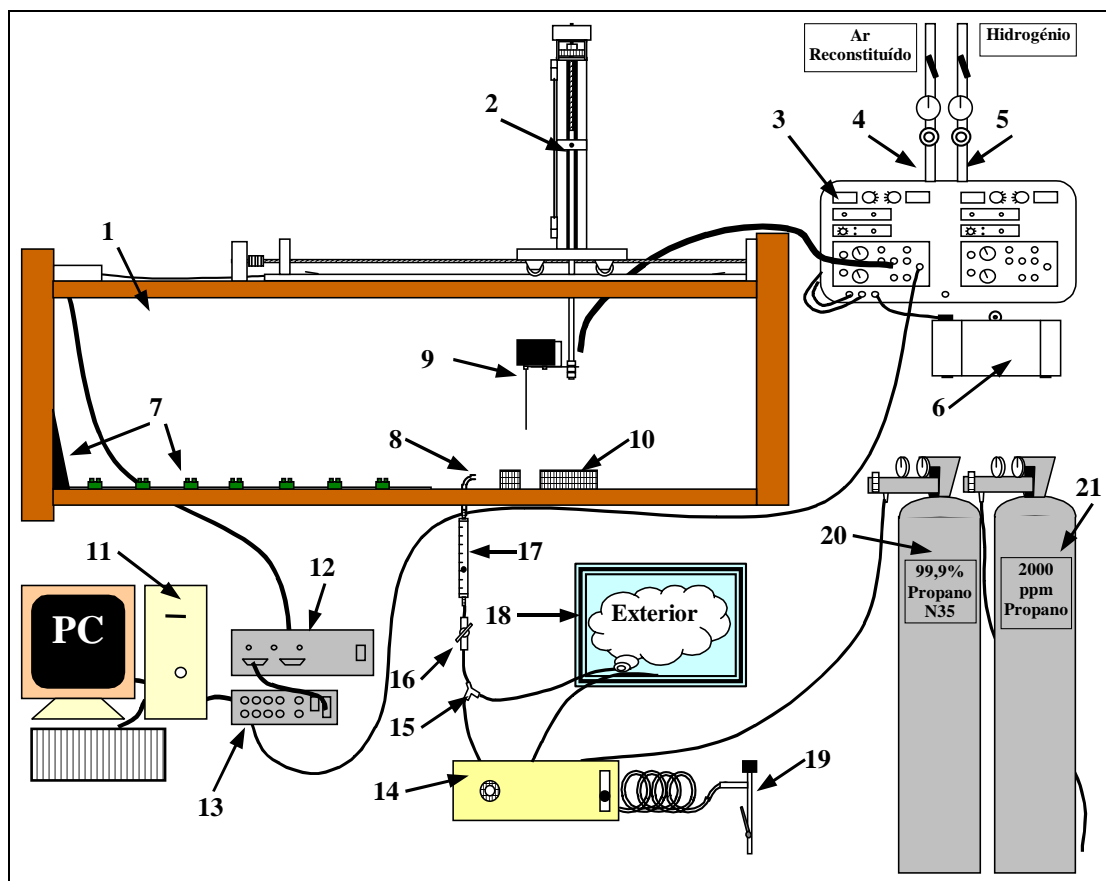


Figura B-3 – Esquema da montagem do equipamento usado na medição do campo de concentrações do escoamento.

Onde,

- | | |
|---|---|
| 1- Secção de ensaios do túnel de vento; | 11- Computador com placa de aquisição de dados e <i>software</i> de controlo do posicionador; |
| 2- Sistema de posicionamento; | 12- <i>Multiplaxer</i> de ligação à placa de aquisição de dados; |
| 3- Unidade principal de controlo do FID; | 13- Módulo controlador do posicionador; |
| 4- Conduta do ar reconstituído; | 14- Misturador de gases; |
| 5- Conduta do hidrogénio; | 15- Bifurcação; |
| 6- Bomba de vácuo; | 16- Regulador de caudal; |
| 7- Rugosidade e <i>spikes</i> utilizados na criação da camada limite; | 17- Rotâmetro de precisão; |
| 8- Chaminé de saída do gás; | 18- Janela para o exterior; |
| 9- Módulo de aquisição de hidrocarbonetos; | 19- Saída de ar comprimido; |
| 10- Obstáculos usados no estudo; | 20- Garrafa com 99,9 % de propano; |
| | 21- Garrafa com 2000 ppm de propano. |

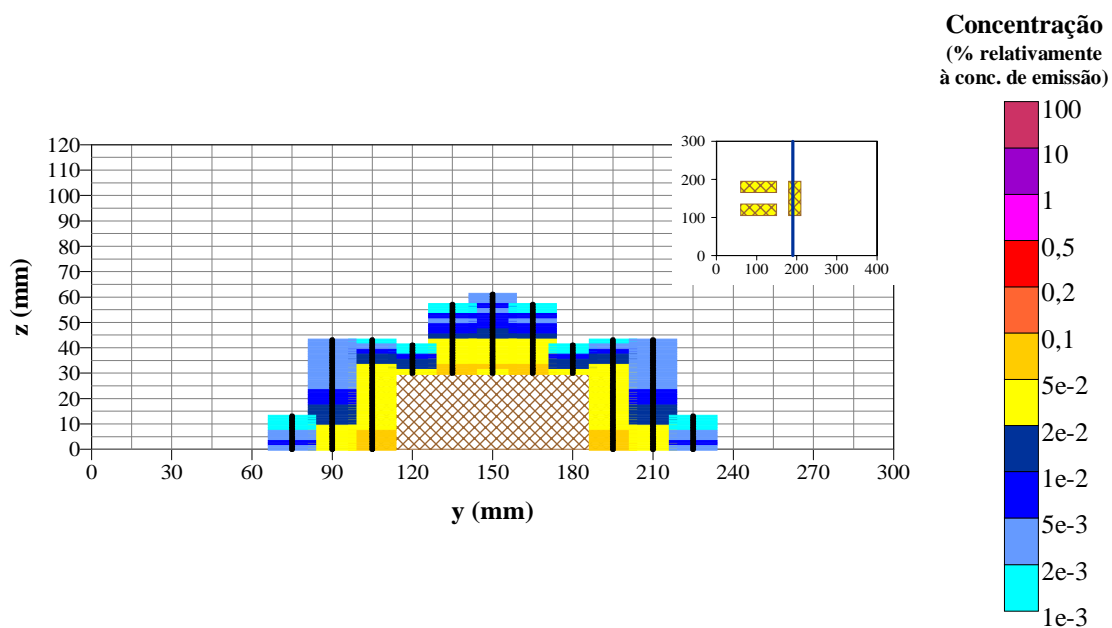


Figura B-4 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um plano yz , para $x = 110$ mm.

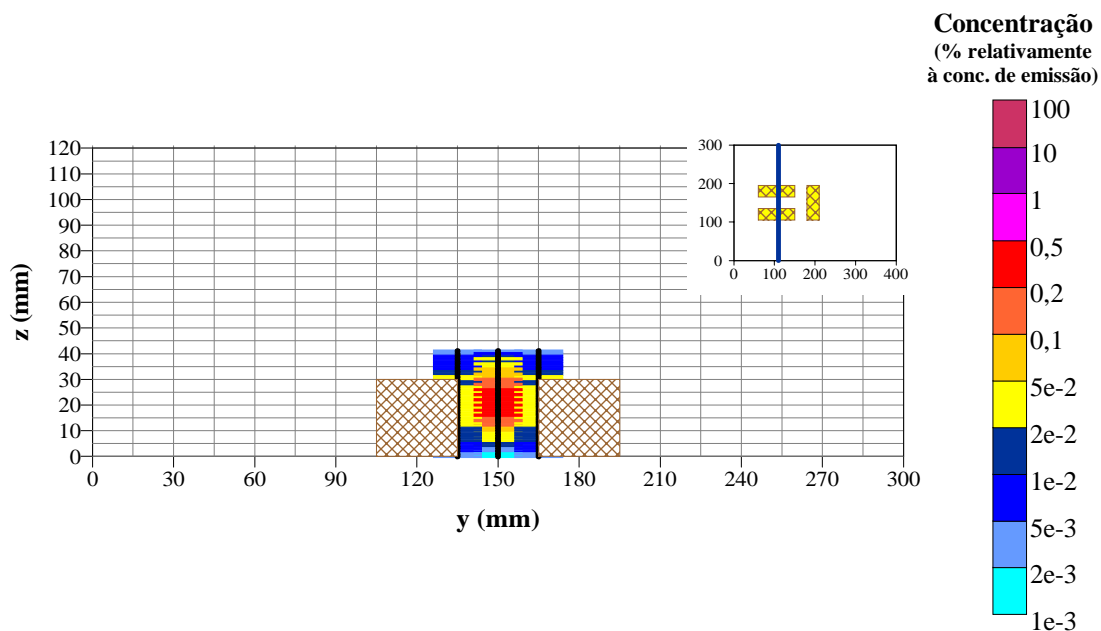


Figura B-5 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um plano yz , para $x = 190$ mm.

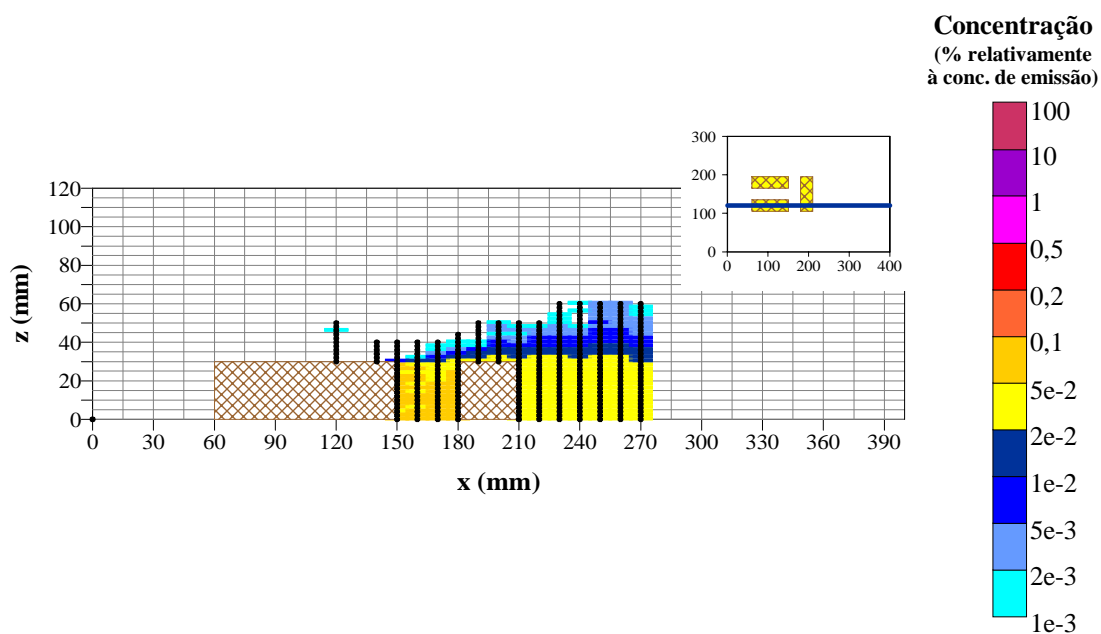


Figura B-6 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um corte xz , para $y = 120$ mm.

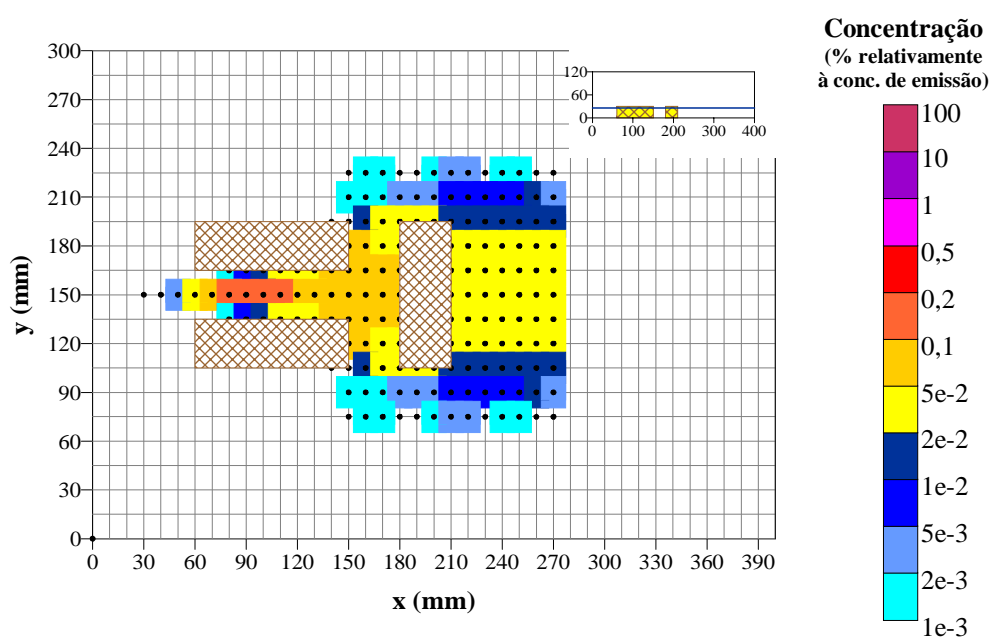


Figura B-7 – Representação do campo de concentrações medidas com o FID segundo um plano xy , para $z = 26$ mm.

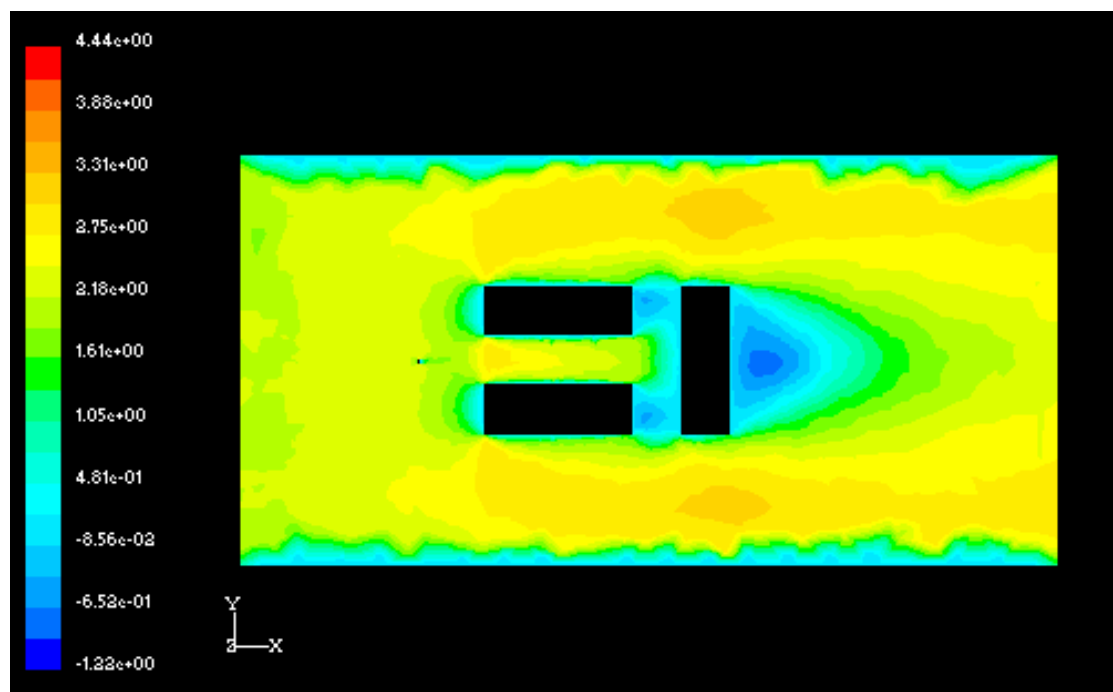


Figura B-8 – Campo de velocidade, componente u , segundo o plano $z = 15$ mm.

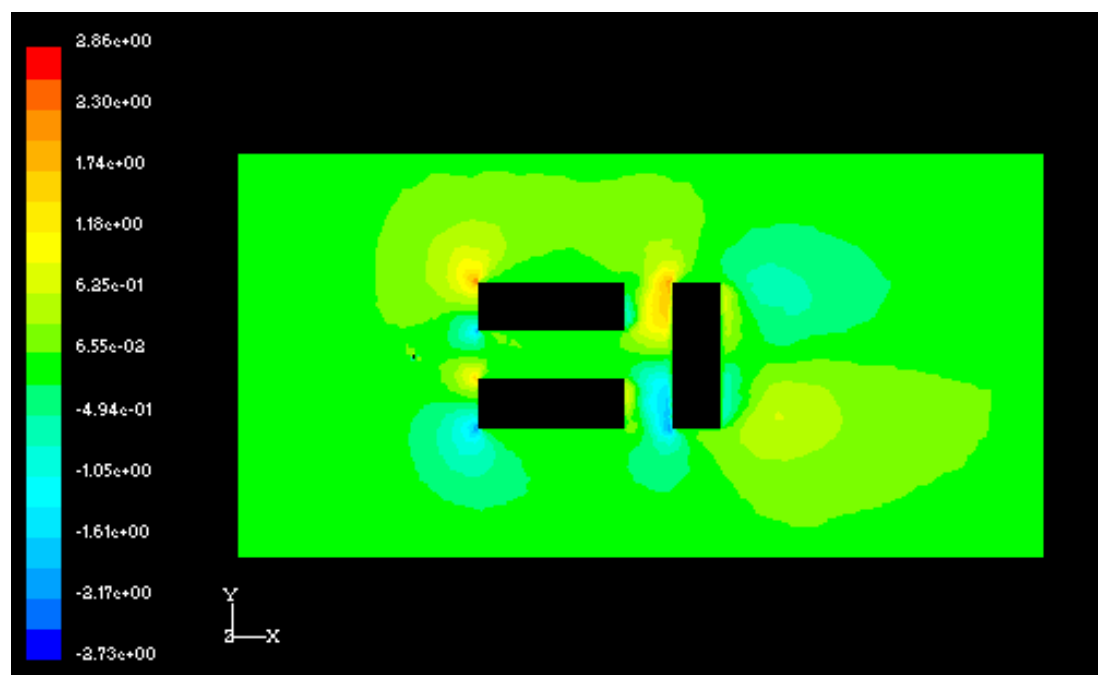


Figura B-9 – Campo de velocidade, componente v , segundo o plano $z = 15$ mm.

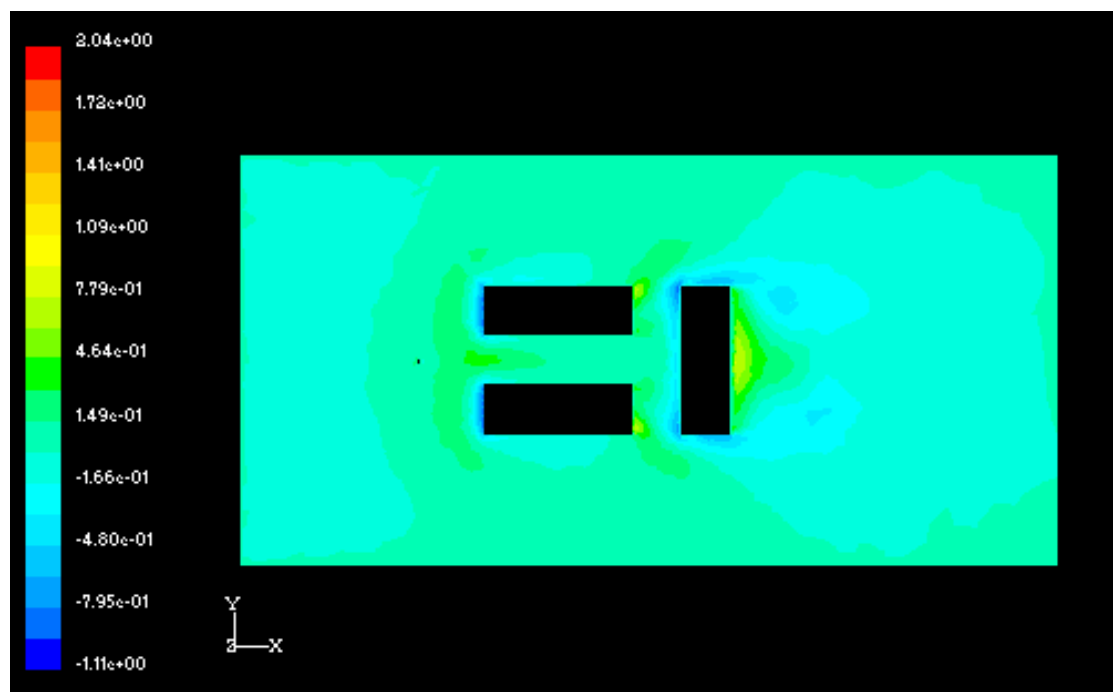


Figura B-10 – Campo de velocidade, componente w , segundo o plano $z = 15$ mm.

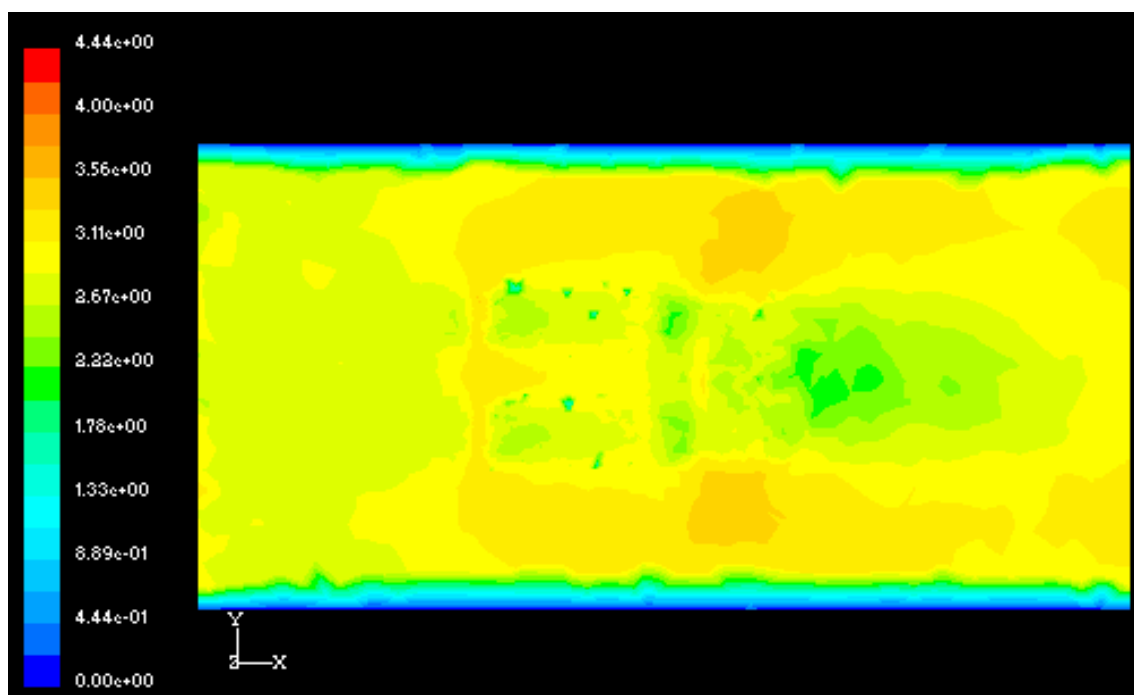


Figura B-11 – Campo de ventos segundo o plano $z = 35$ mm.

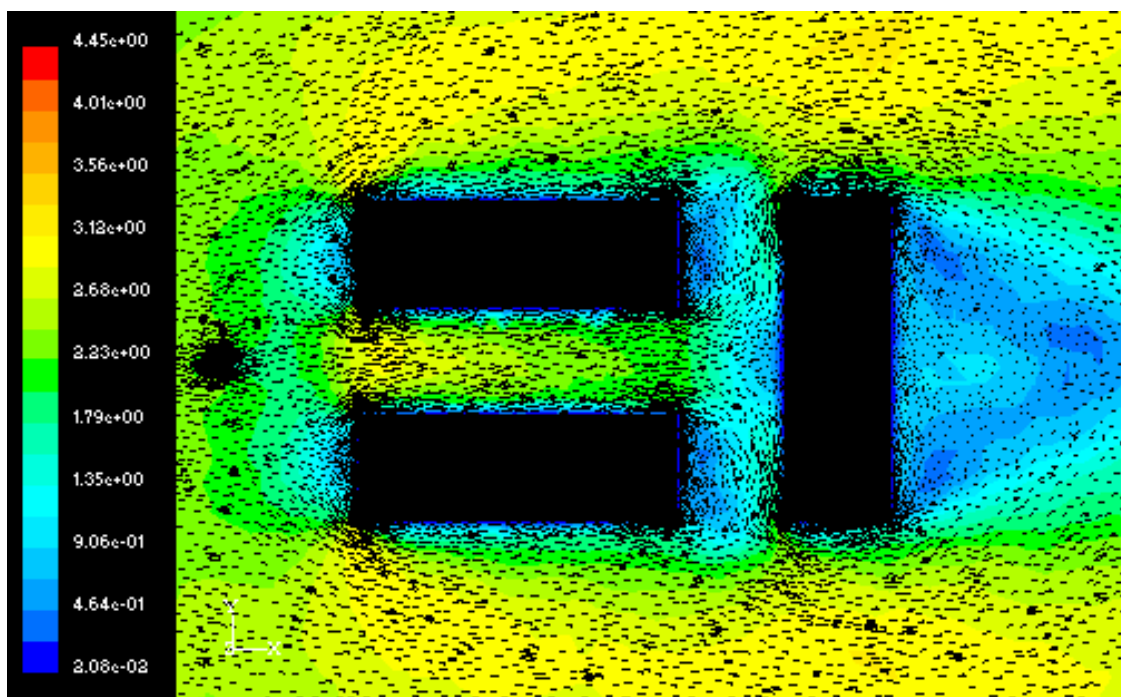


Figura B-12 – Campo de ventos (em linhas isotáquicas e vectores de velocidade) no plano $z = 15$ mm.

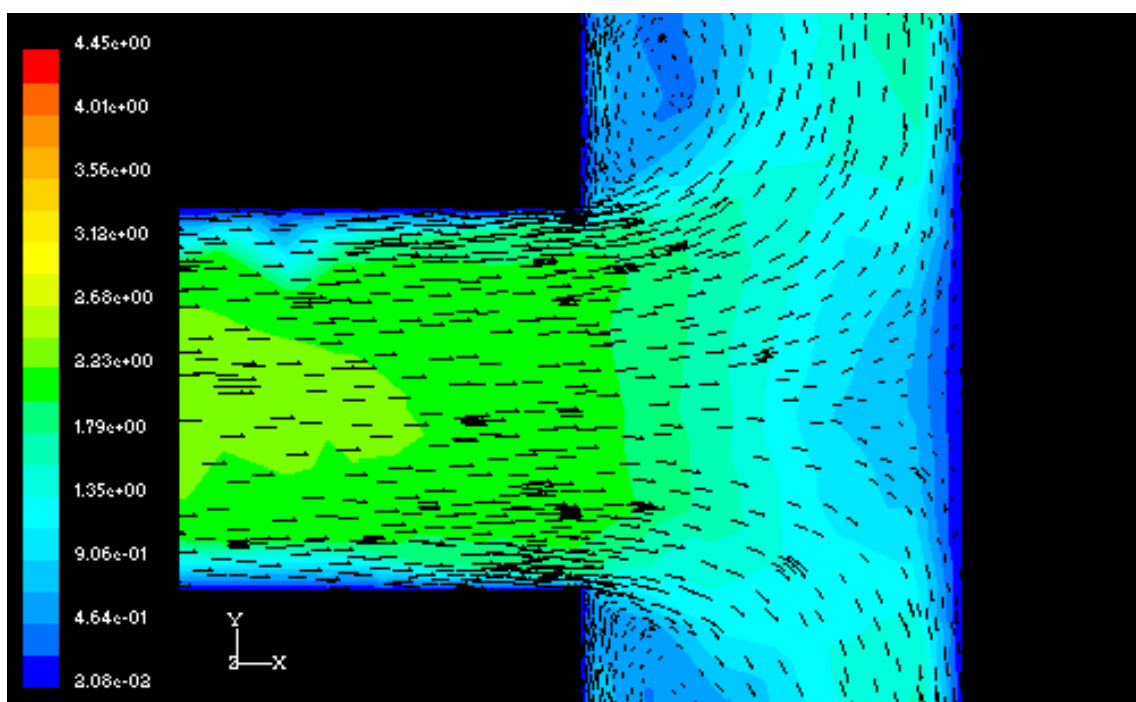


Figura B-13 – Pormenor do campo de ventos (em linhas isotáquicas e vectores de velocidade) no plano $z = 15$ mm.

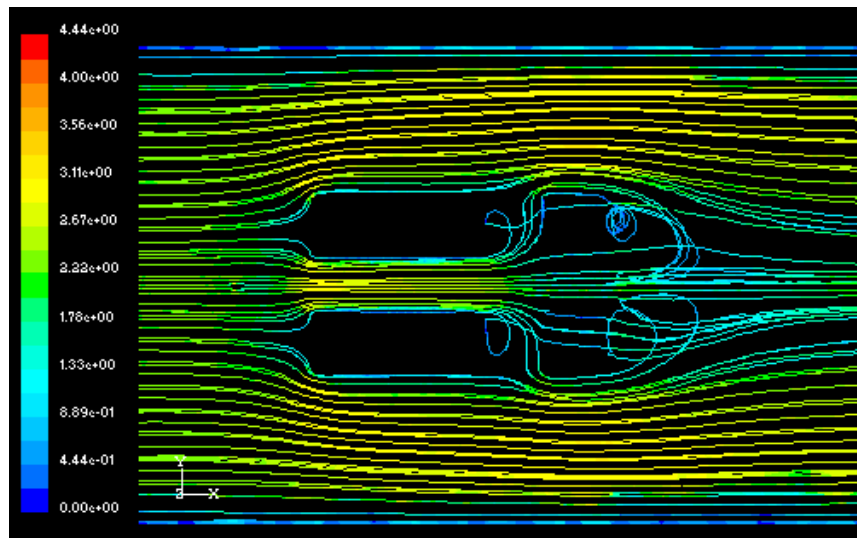


Figura B-14 – Linhas de corrente, coloridas com base na magnitude da velocidade e geradas num eixo horizontal de altura 15 mm localizado à entrada do domínio.

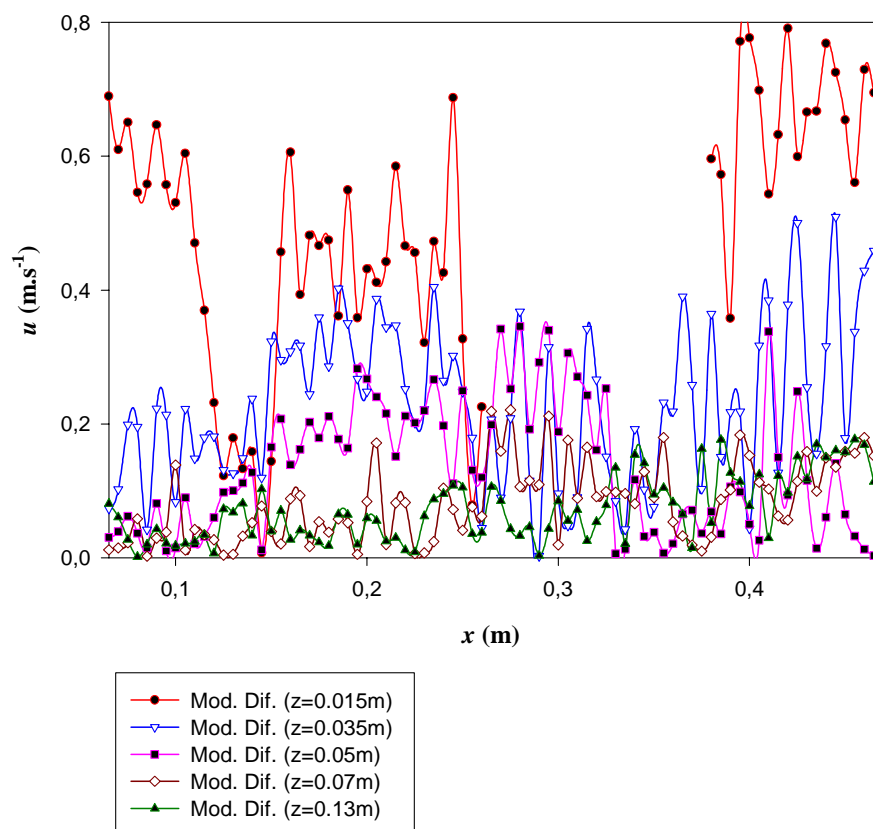


Figura B-15 – Gráfico representativo do módulo da diferença dos valores de u simulados (FLUENT) e medidos (fio-quente), para as cinco alturas definidas.

Caso de Estudo 2: Baixa Pombalina

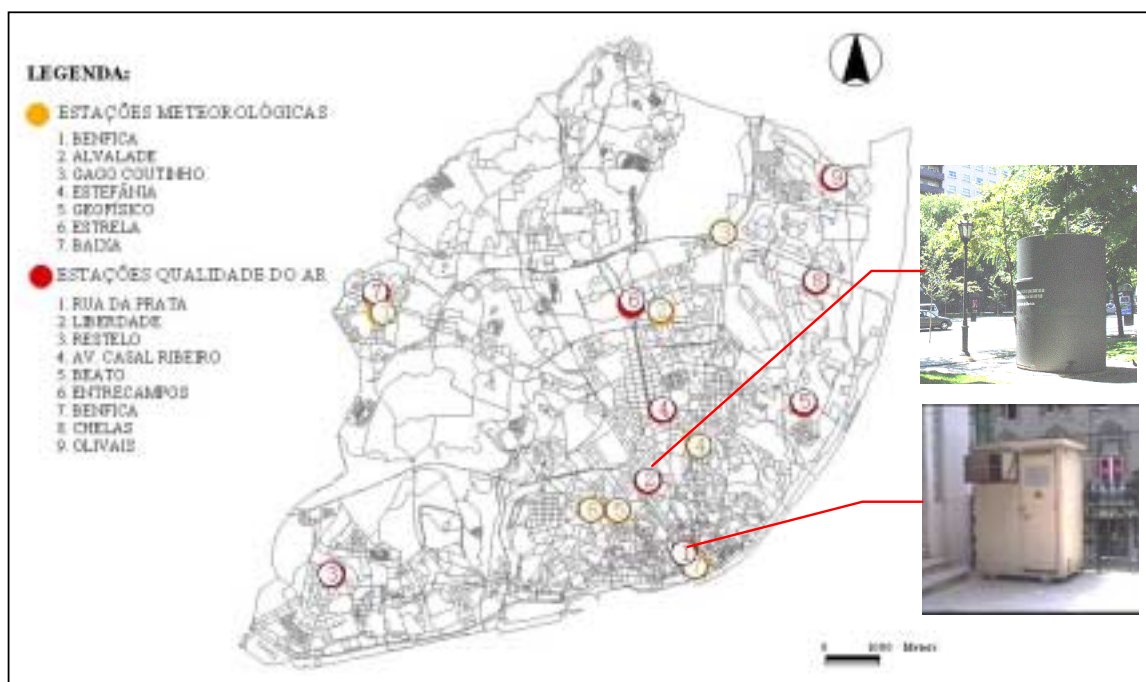


Figura B-16 – Rede de estações meteorológicas e de medição da qualidade do ar da cidade de Lisboa, com as respectivas imagens das estações de monitorização em contínuo da qualidade do ar situadas na Rua da Prata e Avenida da Liberdade.



Figura B-17 – Vista aérea sobre o domínio da baixa de Lisboa [url 5] e perspectiva tridimensional do domínio de cálculo considerado.

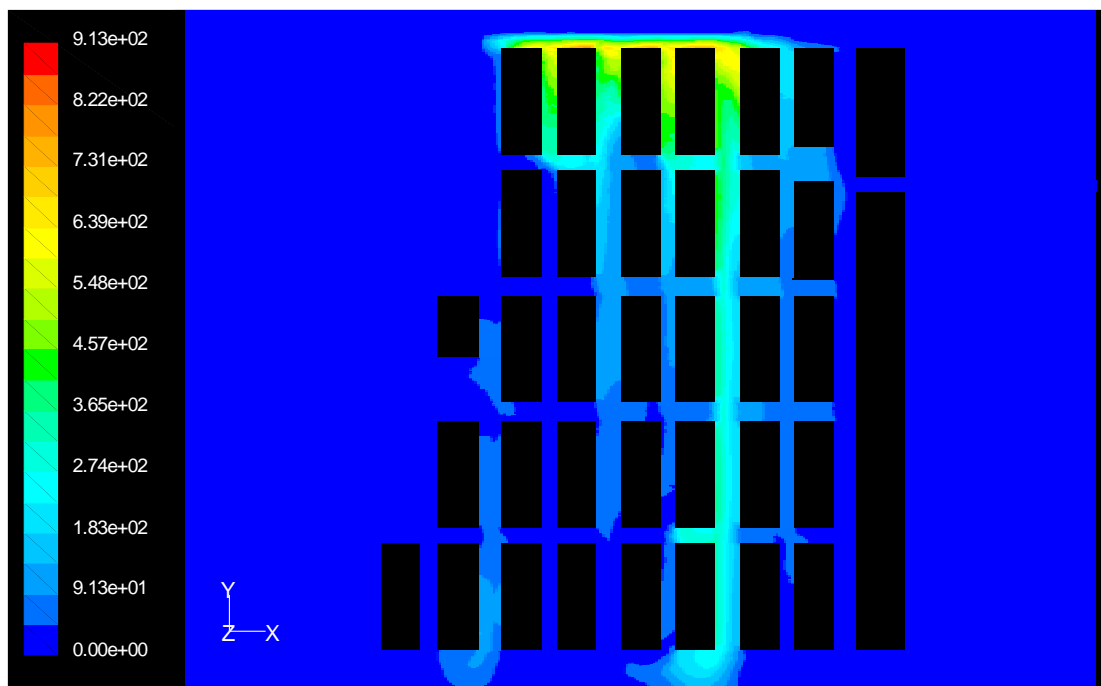


Figura B-18 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 0 à 1 hora.

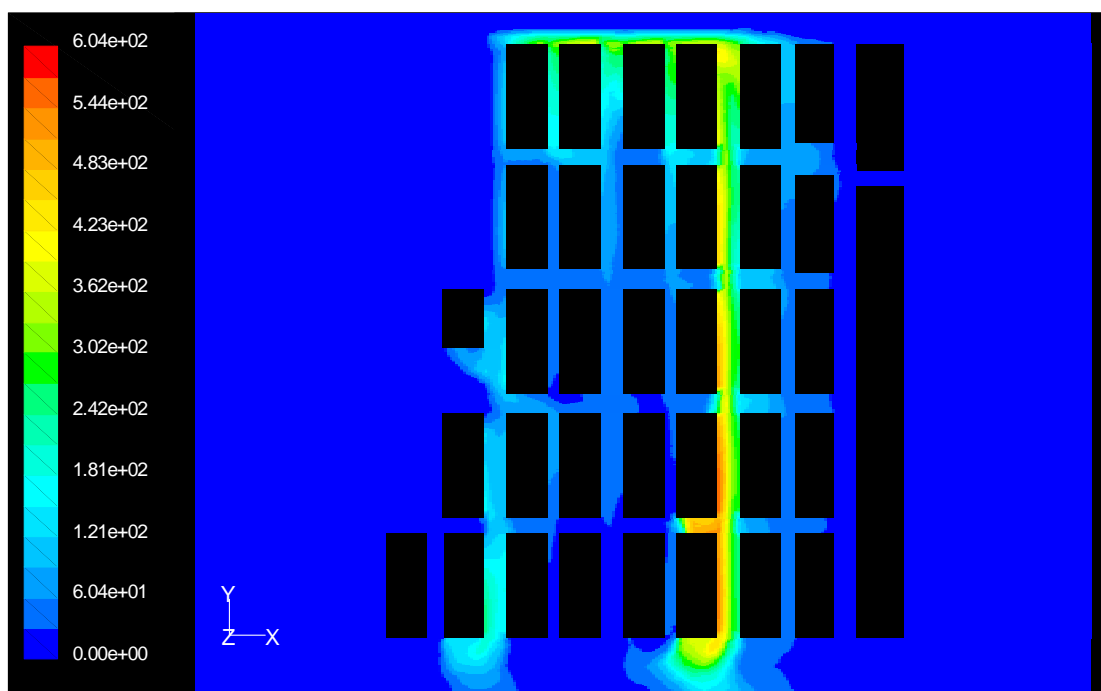


Figura B-19 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período da 1 às 2 horas.

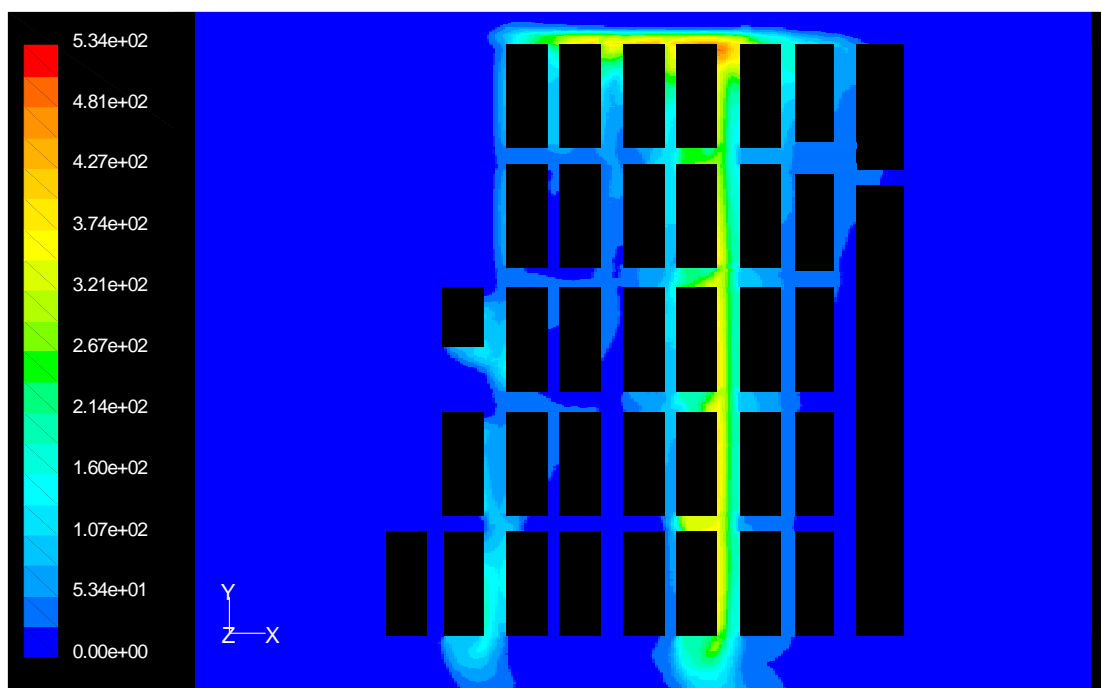


Figura B-20 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 2 às 3 horas.

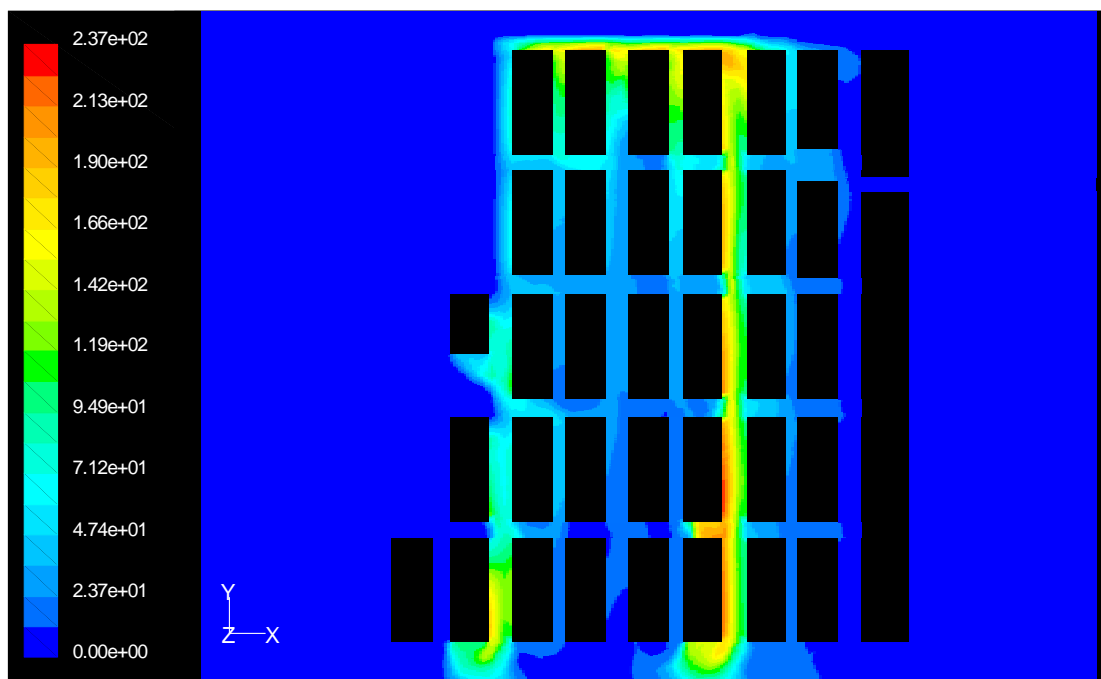


Figura B-21 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 3 às 4 horas.

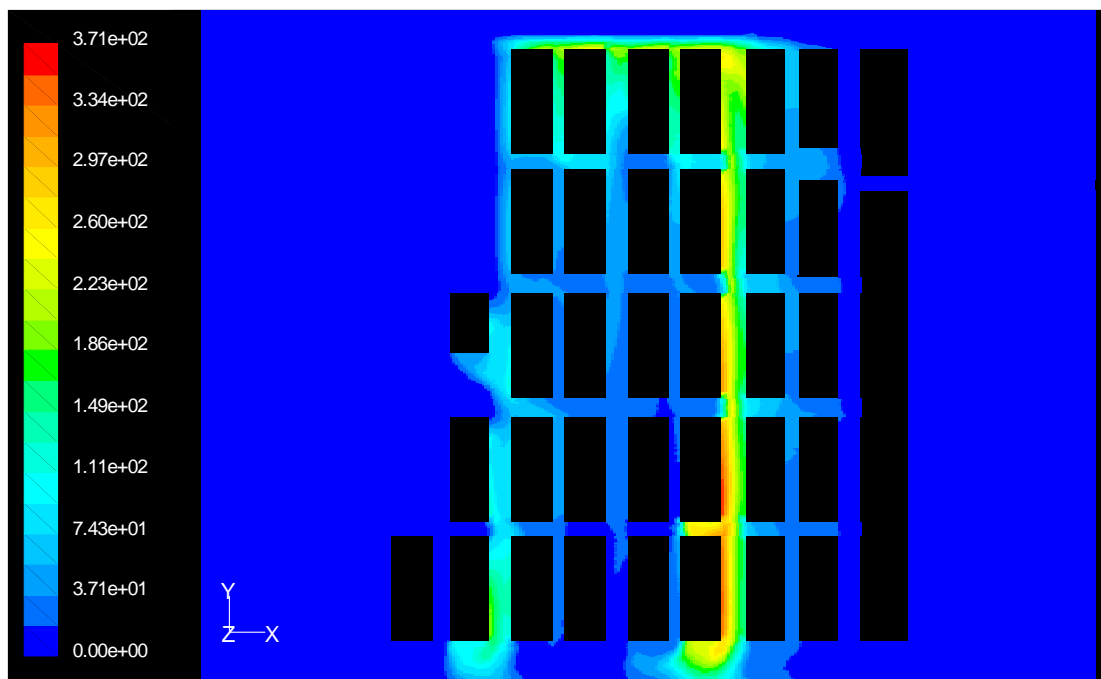


Figura B-22 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 4 às 5 horas.

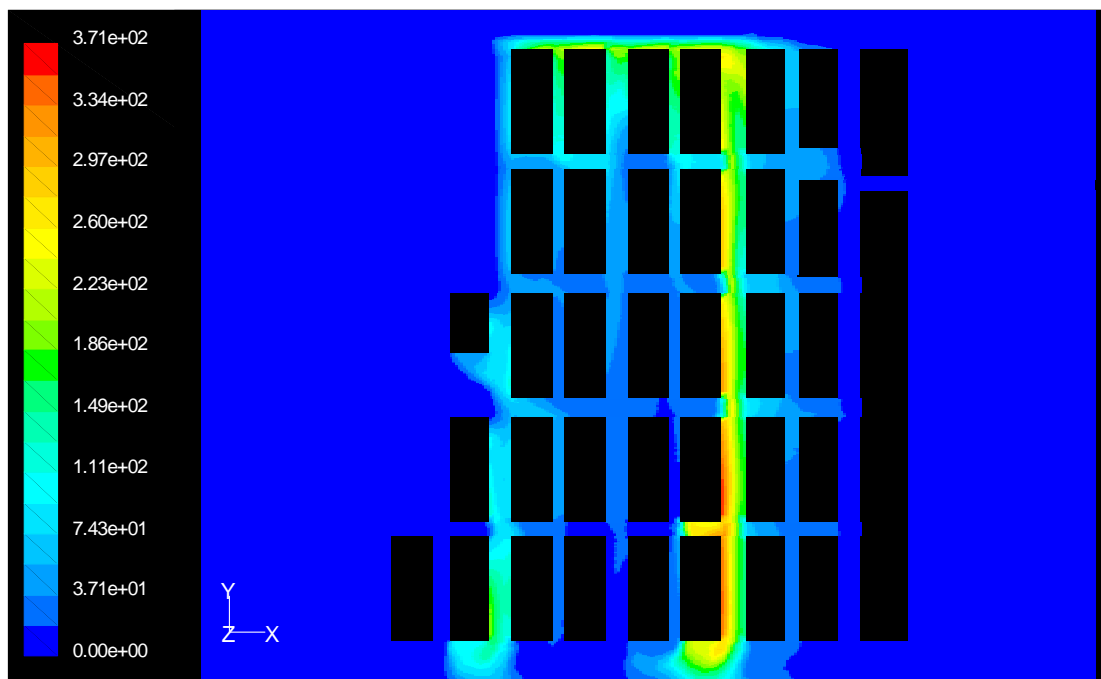


Figura B-23 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 5 às 6 horas.

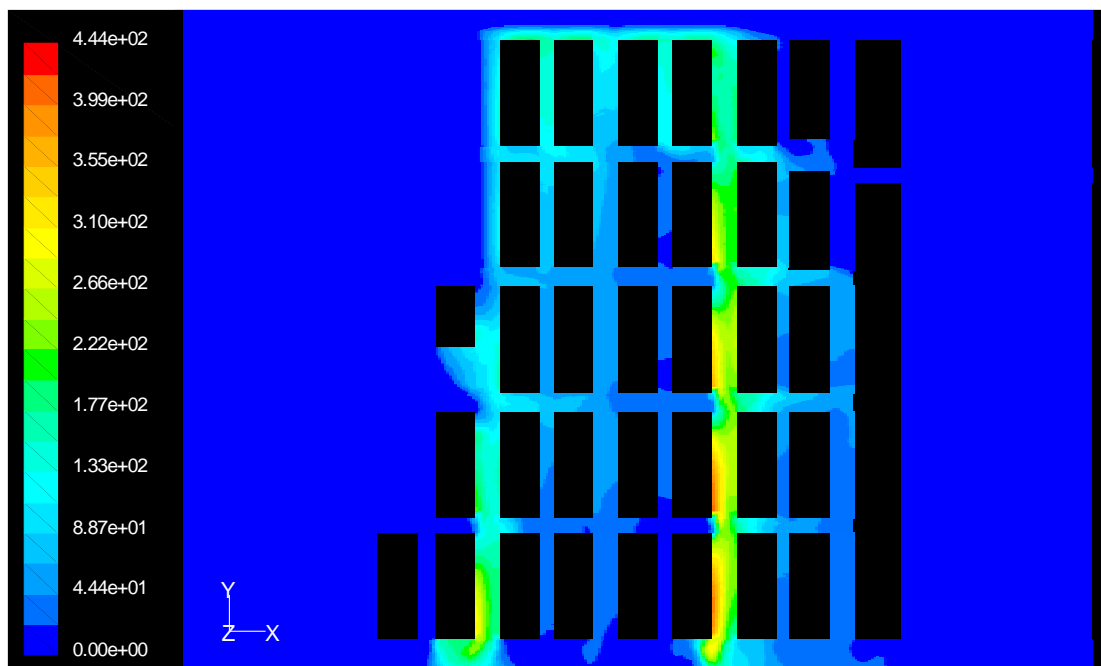


Figura B-24 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 6 às 7 horas.

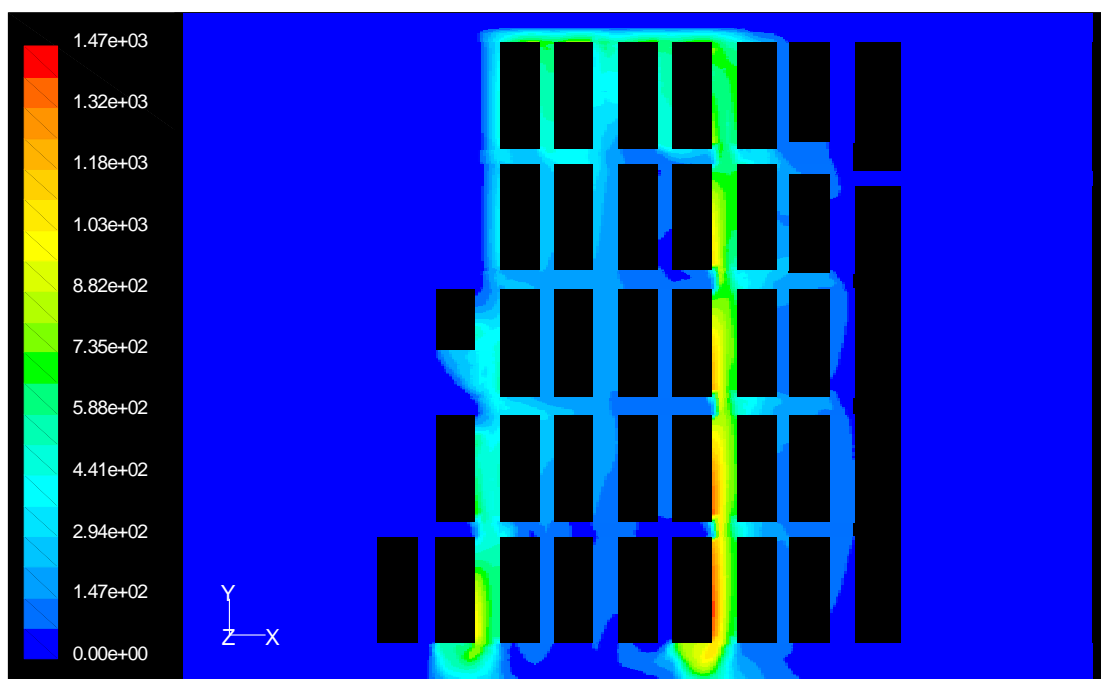


Figura B-25 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 7 às 8 horas.

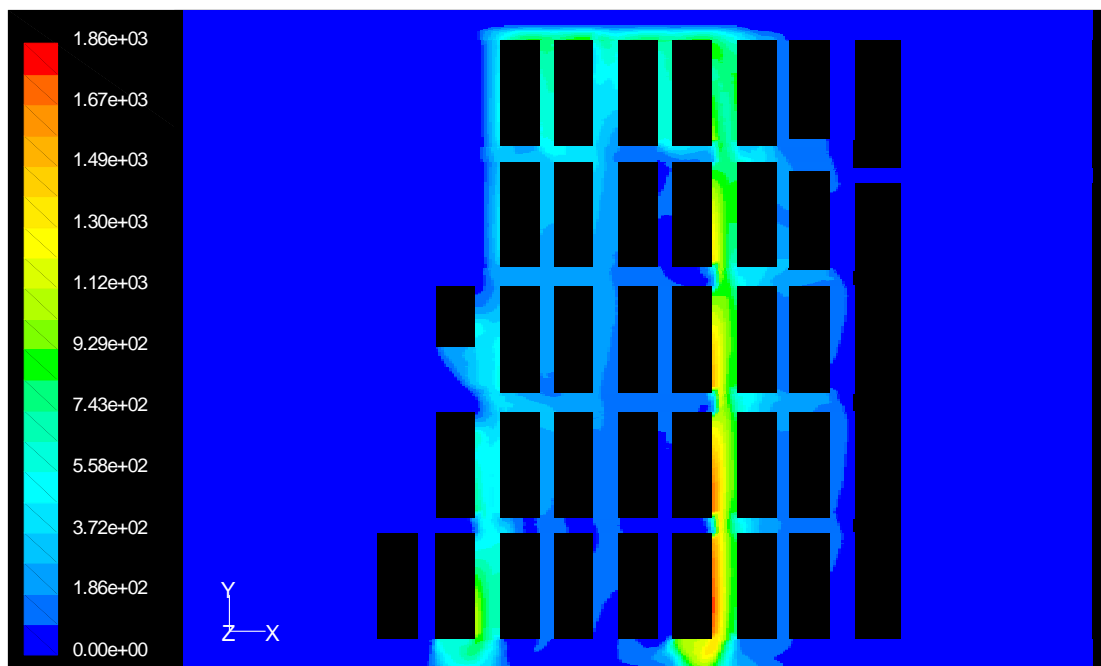


Figura B-26 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 8 às 9 horas.

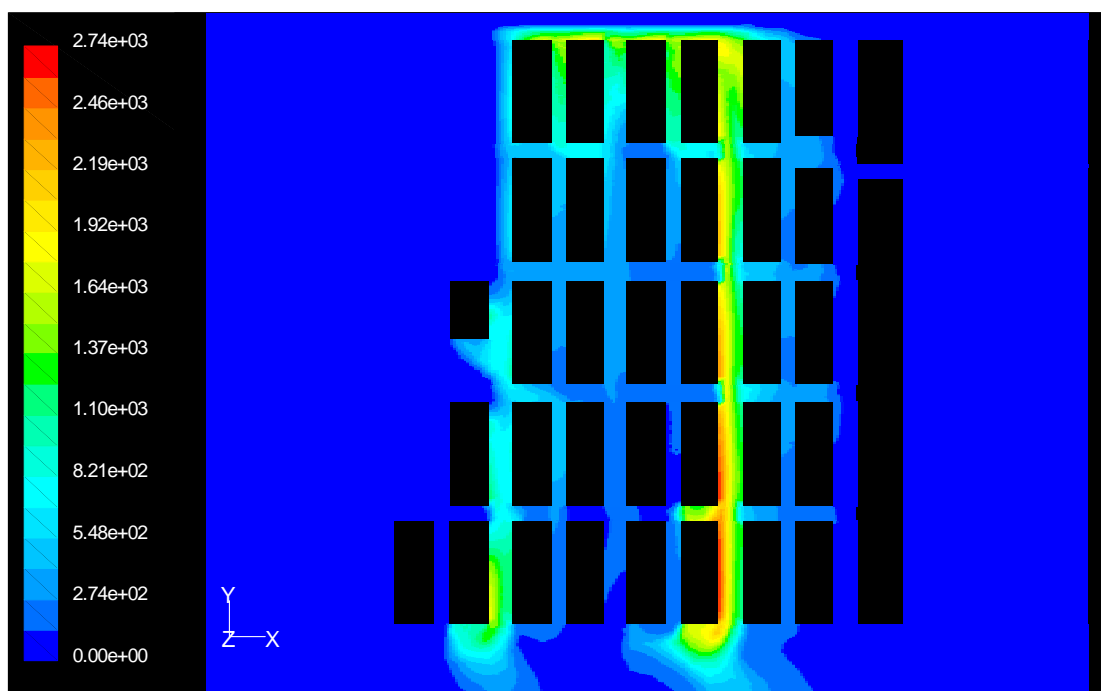


Figura B-27 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 9 às 10 horas.

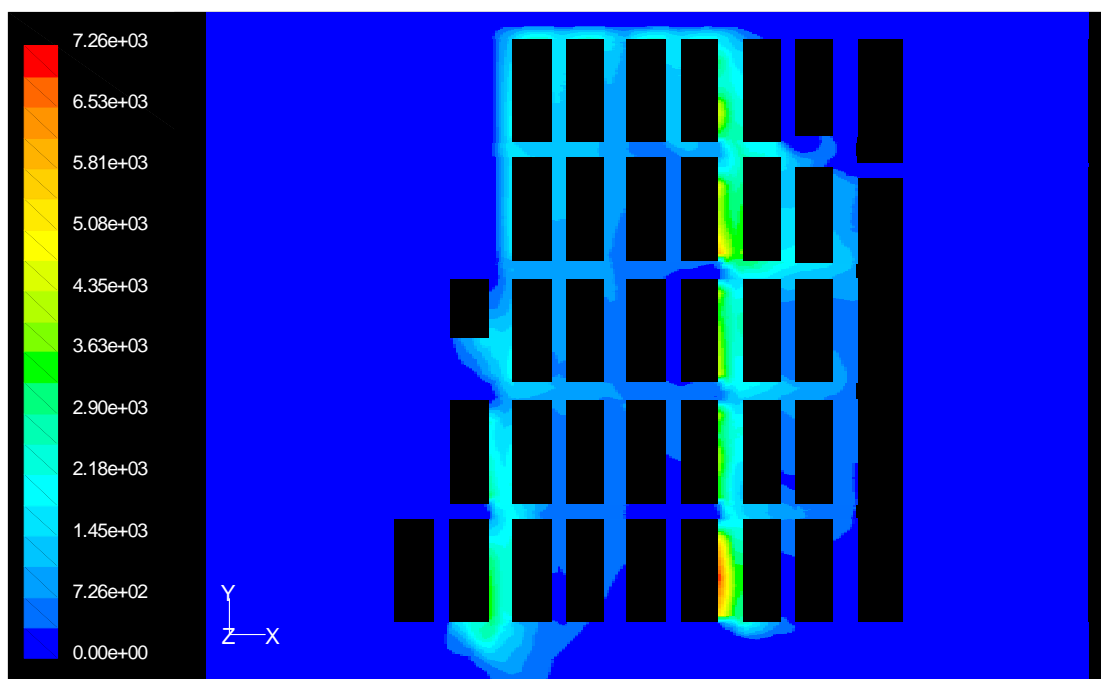


Figura B-28 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 10 às 11 horas.

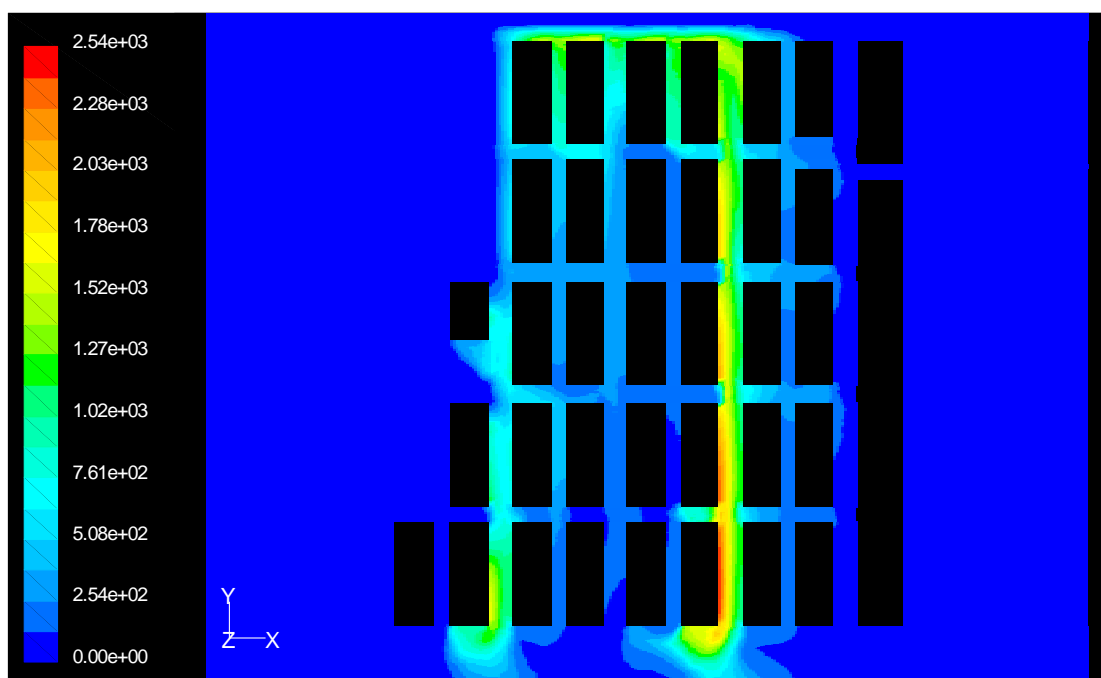


Figura B-29 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 11 às 12 horas.

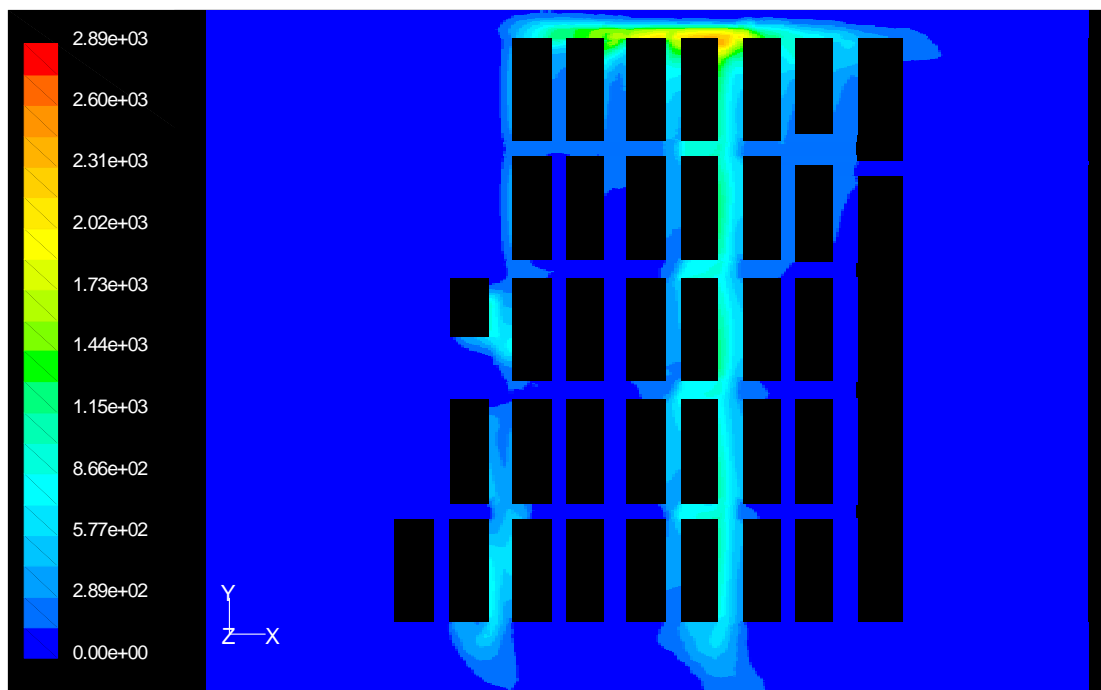


Figura B-30 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 12 às 13 horas.

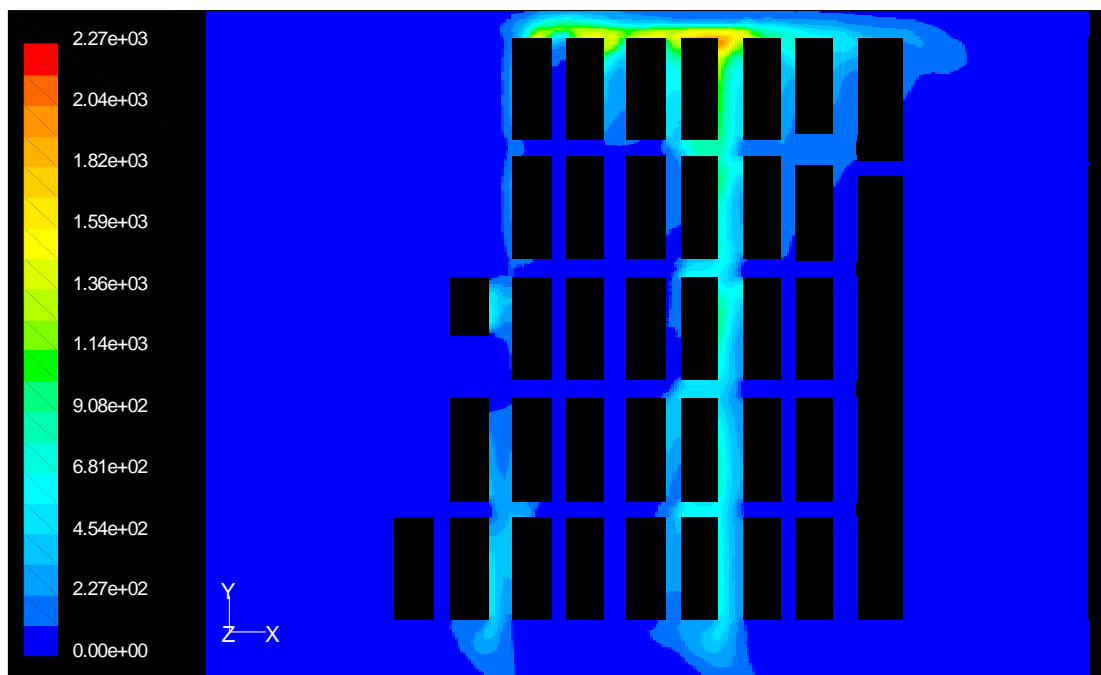


Figura B-31 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 13 às 14 horas.

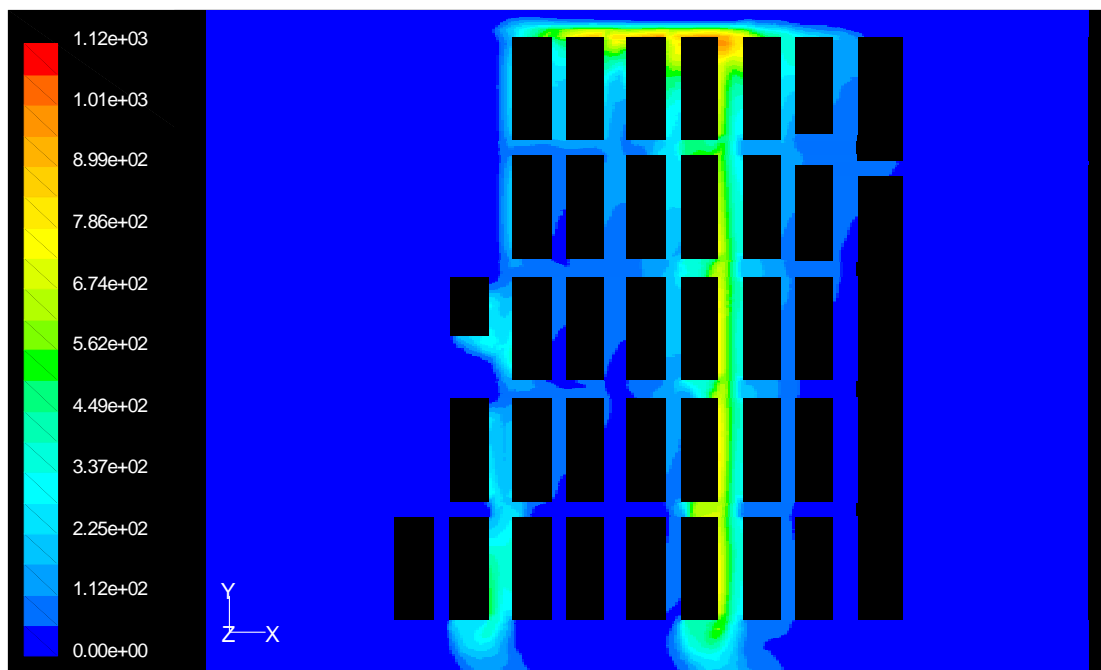


Figura B-32 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 14 às 15 horas.

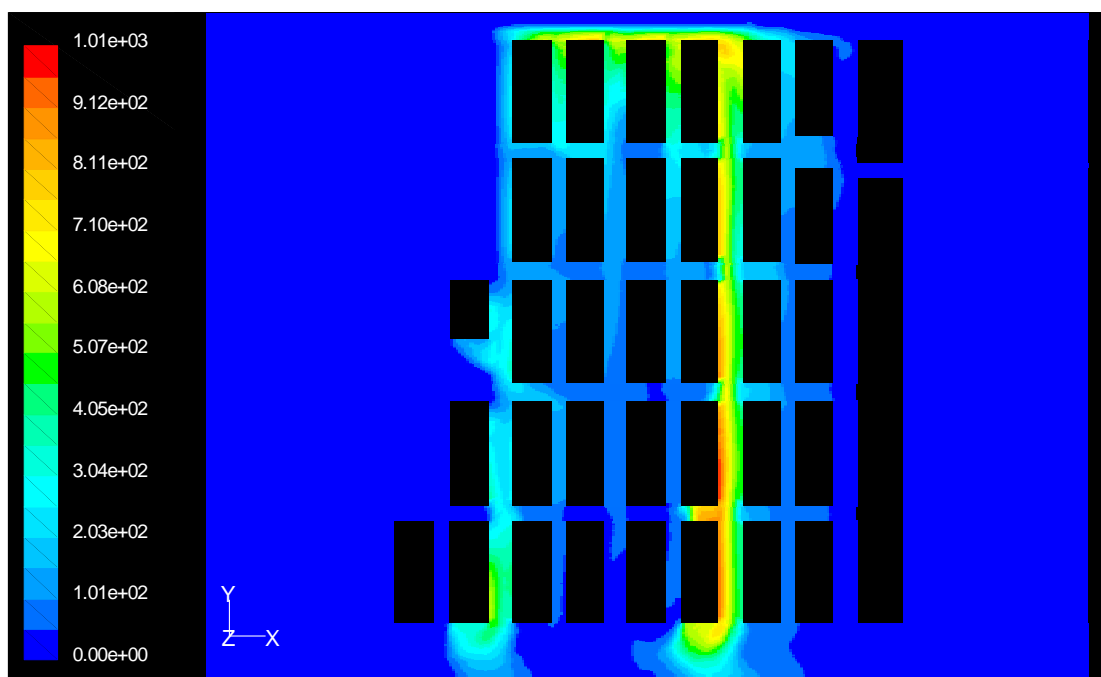


Figura B-33 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 15 às 16 horas.

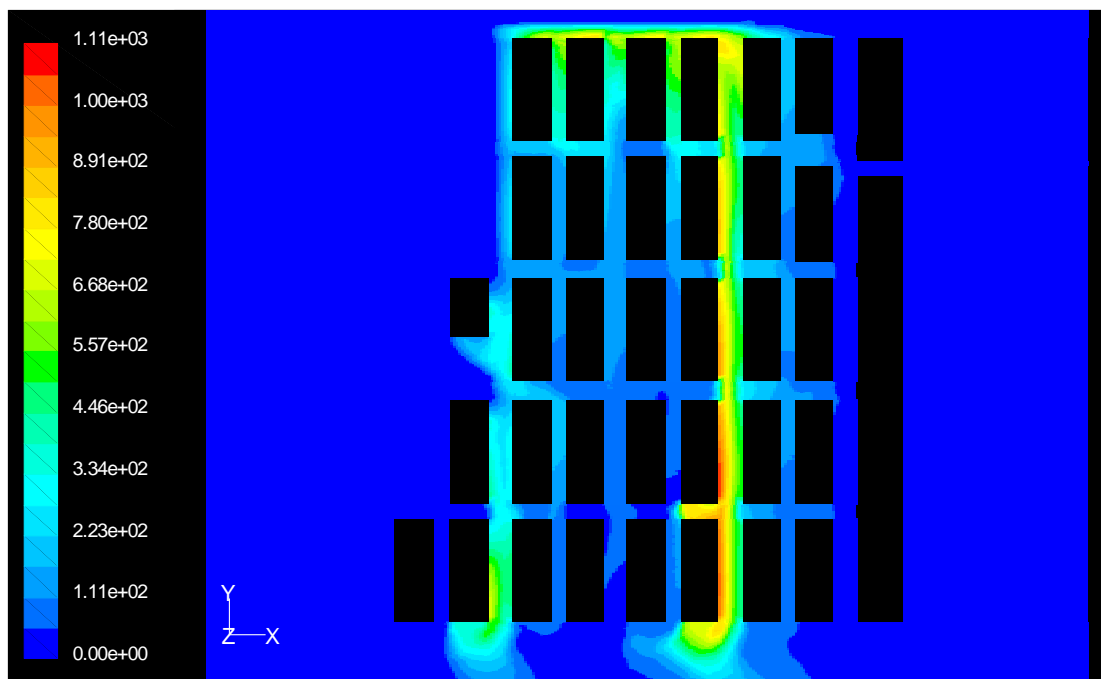


Figura B-34 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 16 às 17 horas.

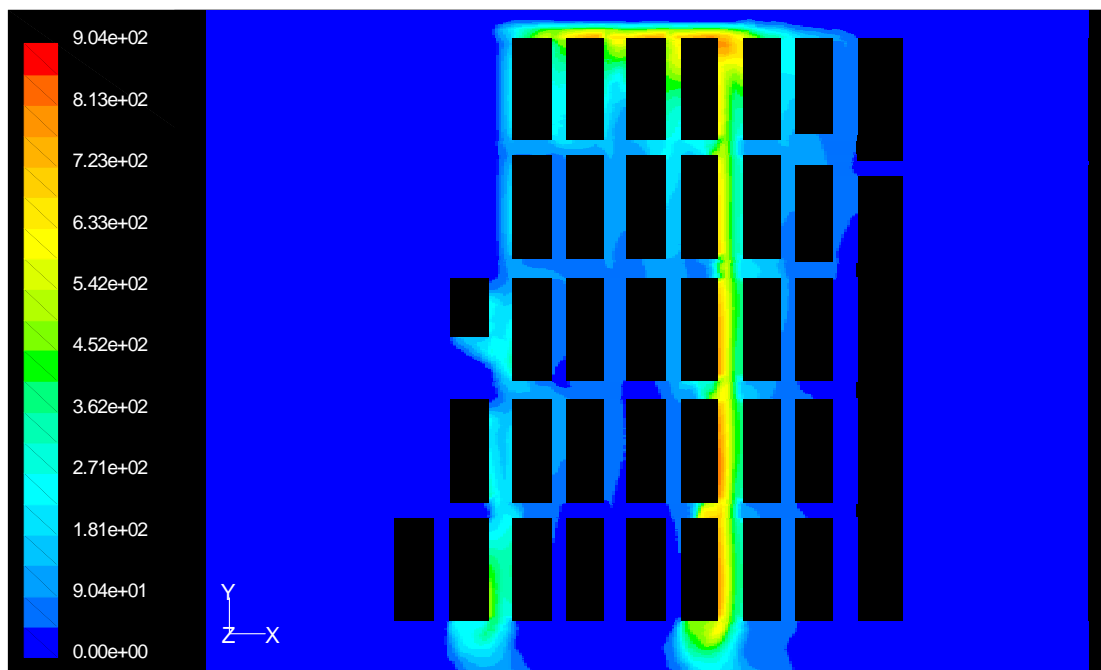


Figura B-35 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 17 às 18 horas.

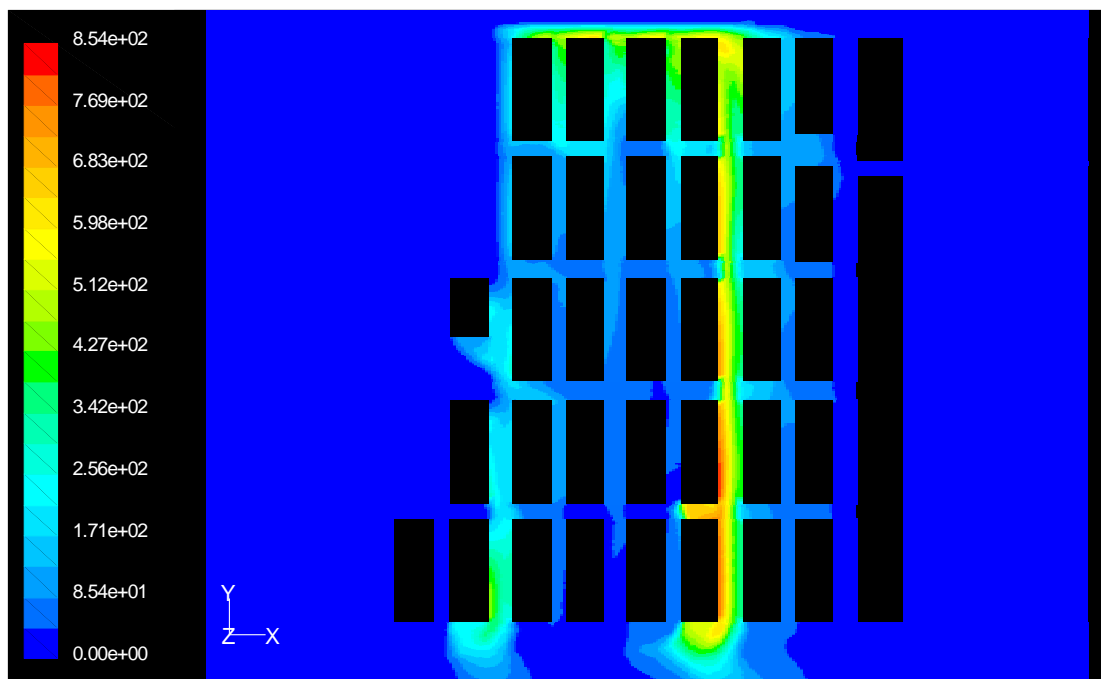


Figura B-36 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 18 às 19 horas.

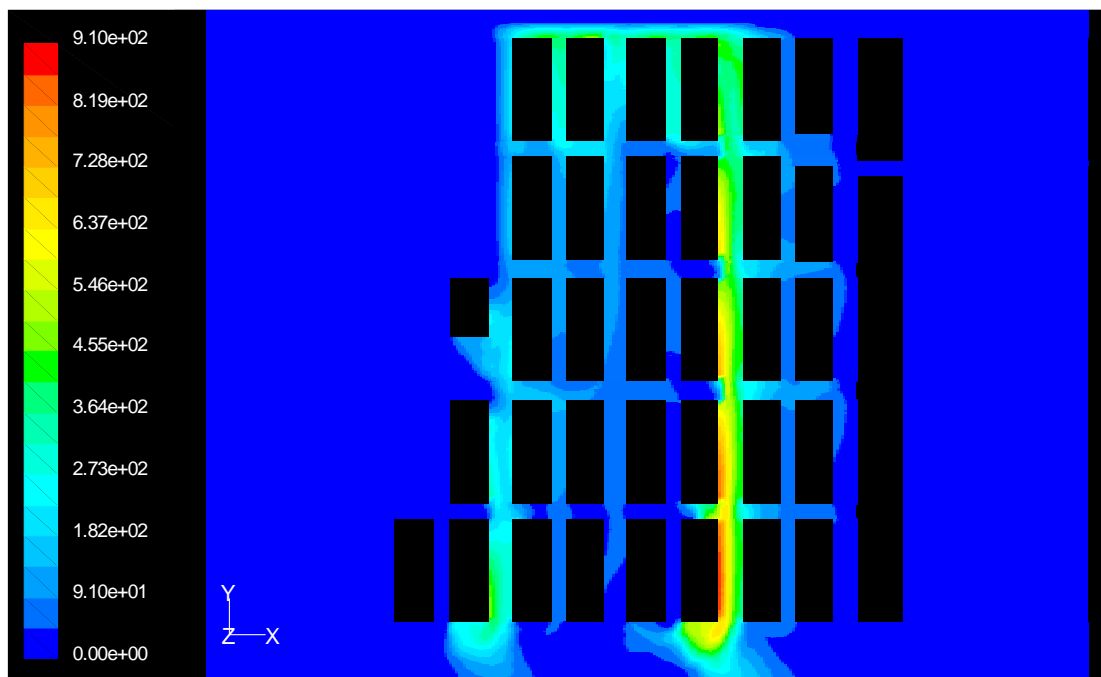


Figura B-37 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 19 às 20 horas.

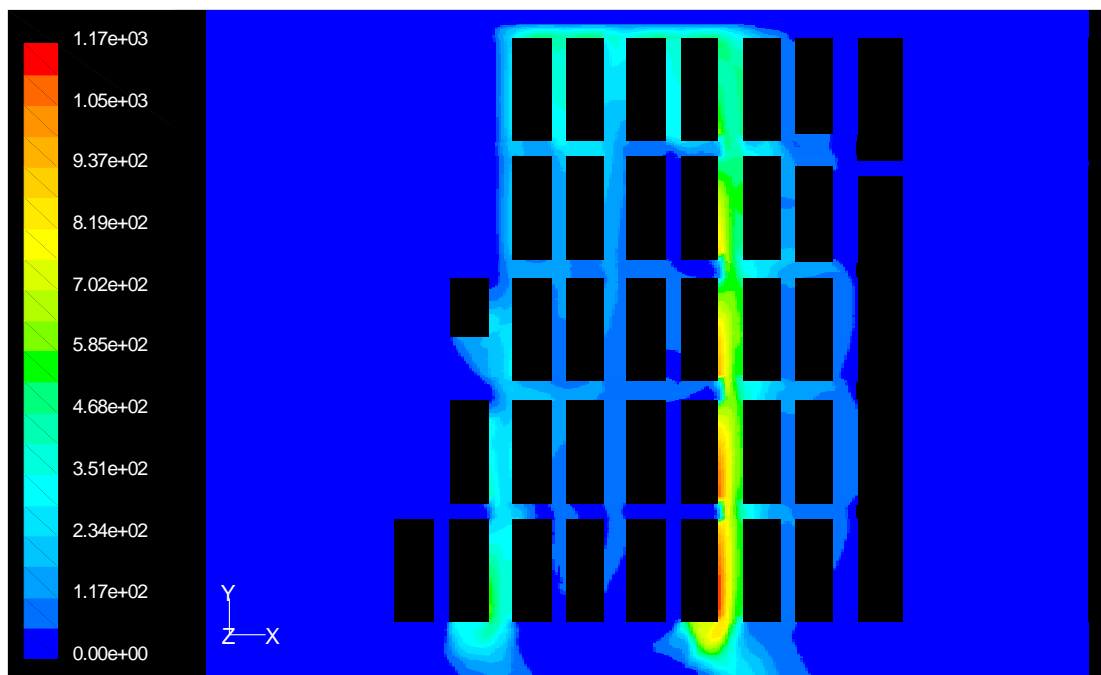


Figura B-38 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 20 às 21 horas.

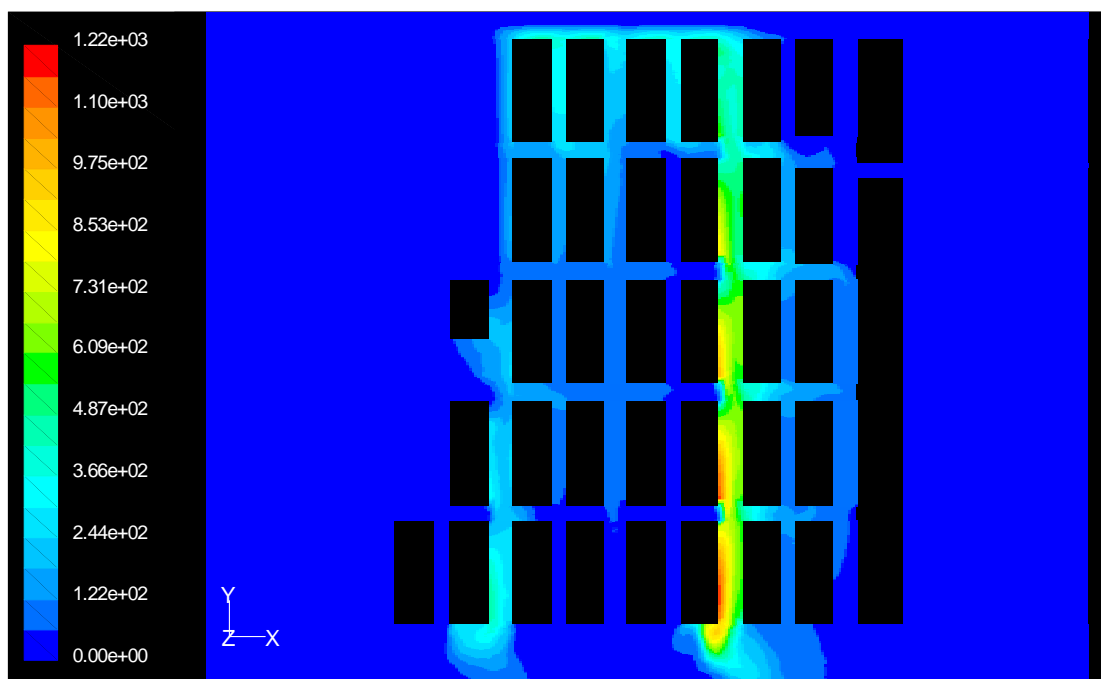


Figura B-39 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 21 às 22 horas.

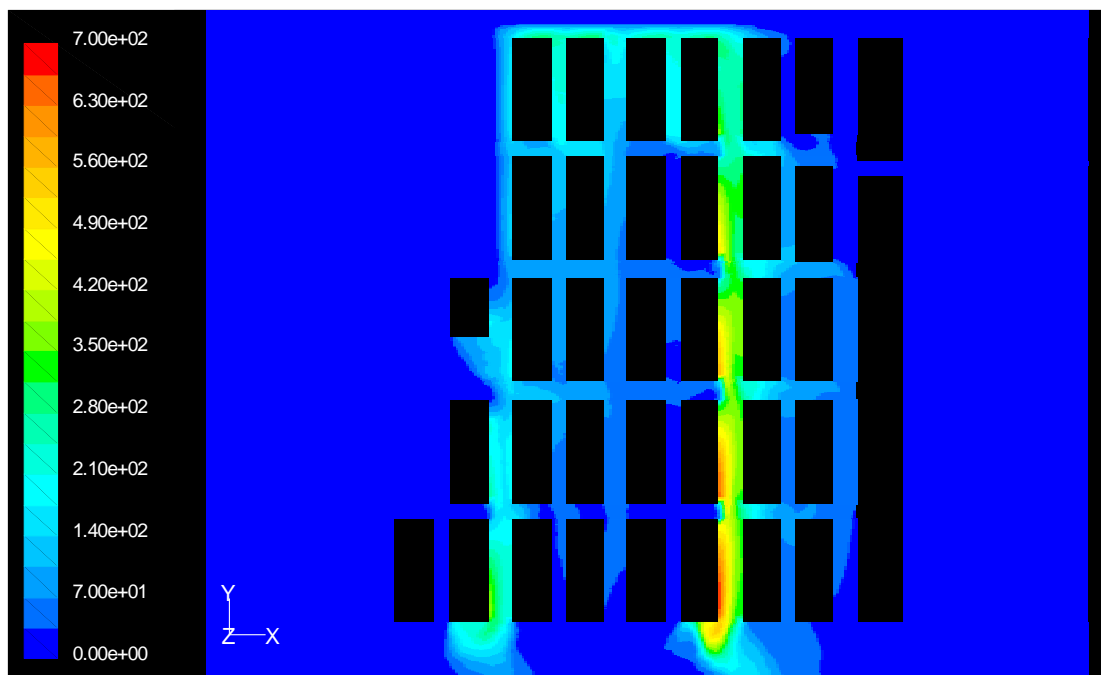


Figura B-40 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 22 às 23 horas.

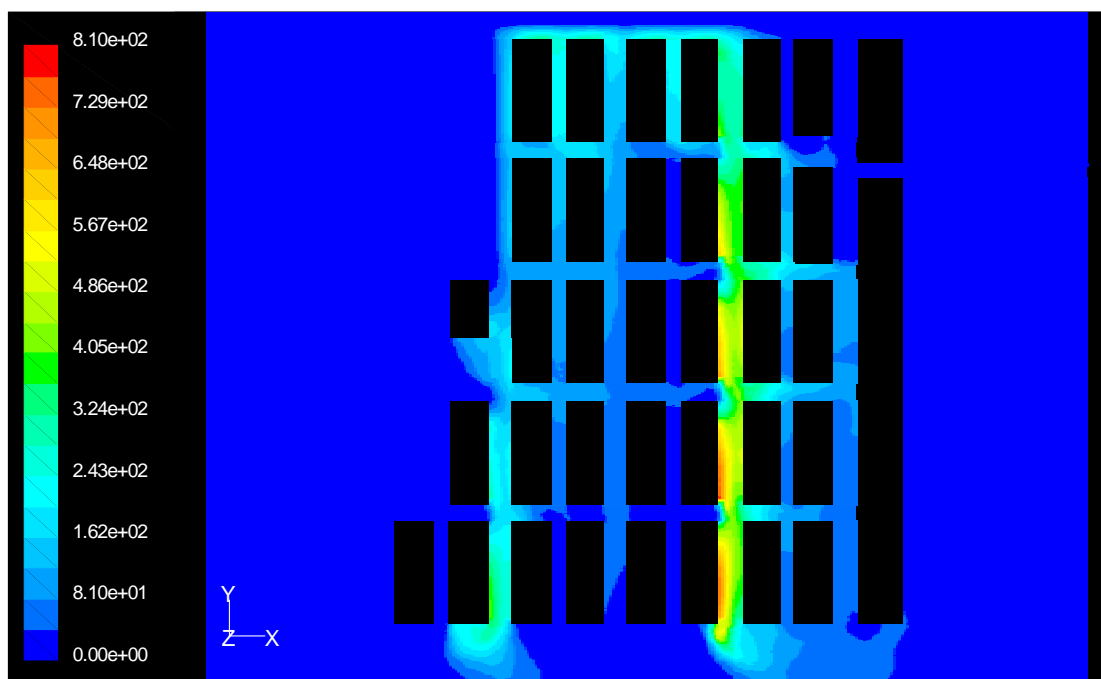


Figura B-41 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Baixa Pombalina, no período das 23 às 24 horas.

Anexo C - Aplicação do FLUENT à Avenida da Liberdade



Figura C-1 – Vista aérea sobre o domínio da Avenida da Liberdade [url 5] e perspectiva sobre o corredor central.

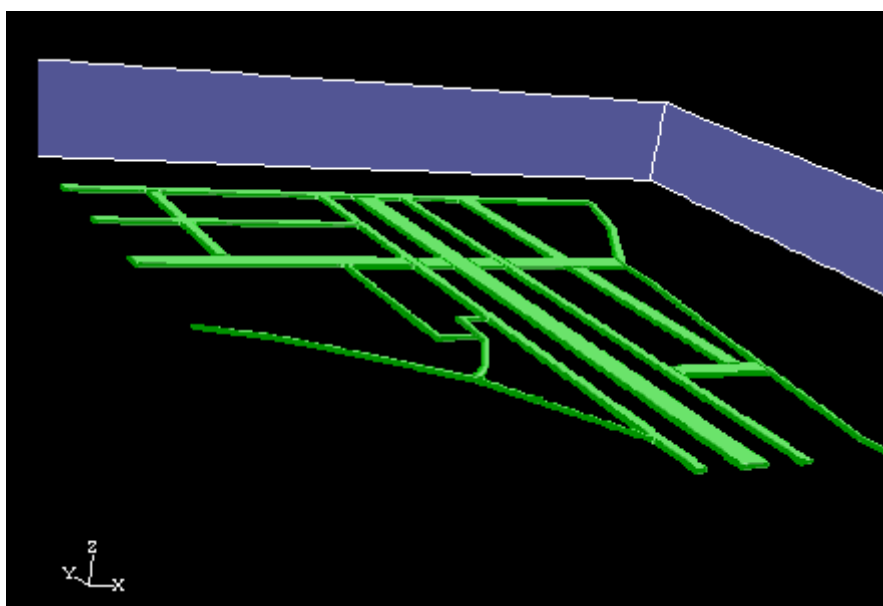


Figura C-2 – Perspectiva tridimensional das fontes de emissão existentes no domínio de simulação da Avenida da Liberdade tal como definidas no FLUENT.

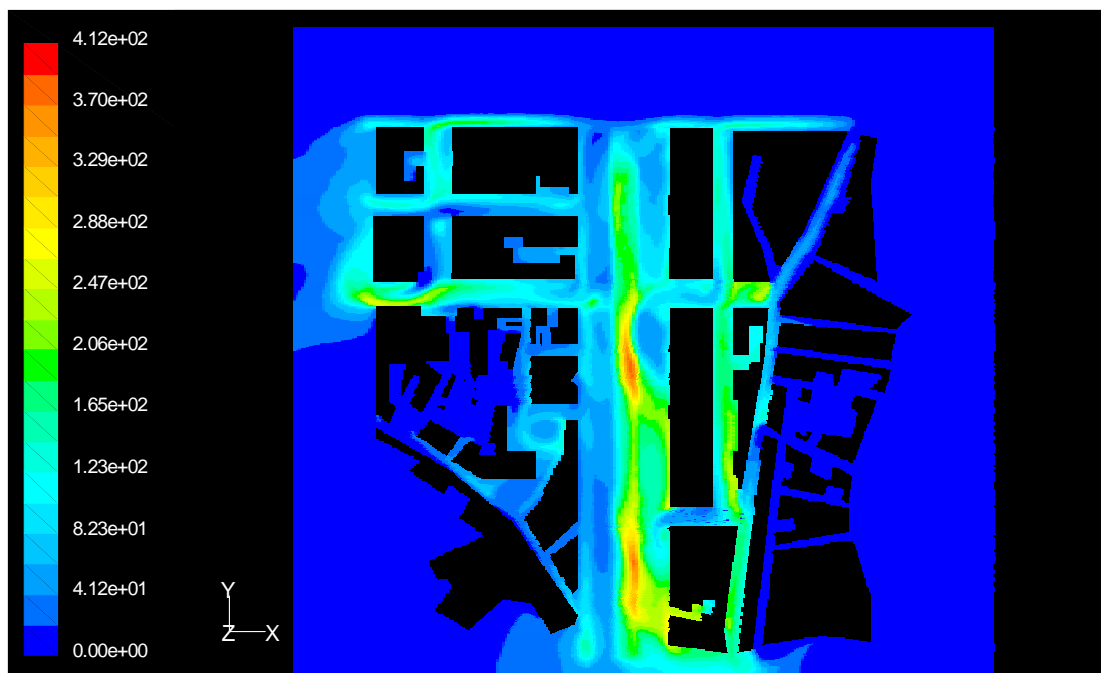


Figura C-3 – Campo horizontal (de altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 0 à 1 hora.

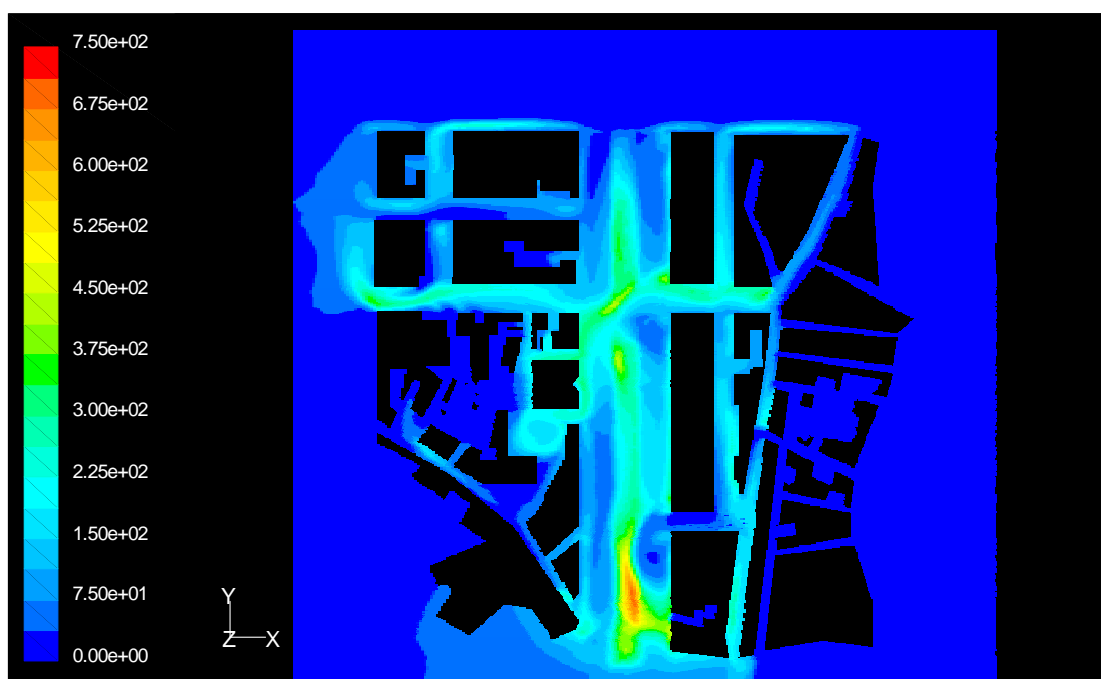


Figura C-4 – Campo horizontal (de altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período da 1 às 2 horas.

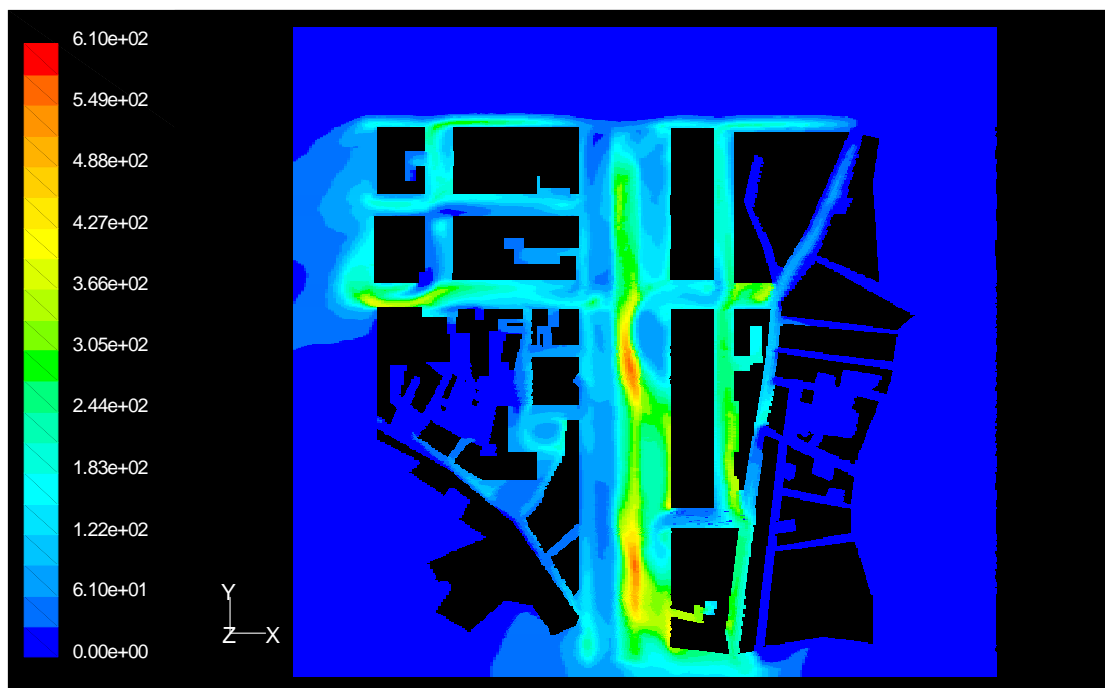


Figura C-5 – Campo horizontal (de altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 2 às 3 horas.

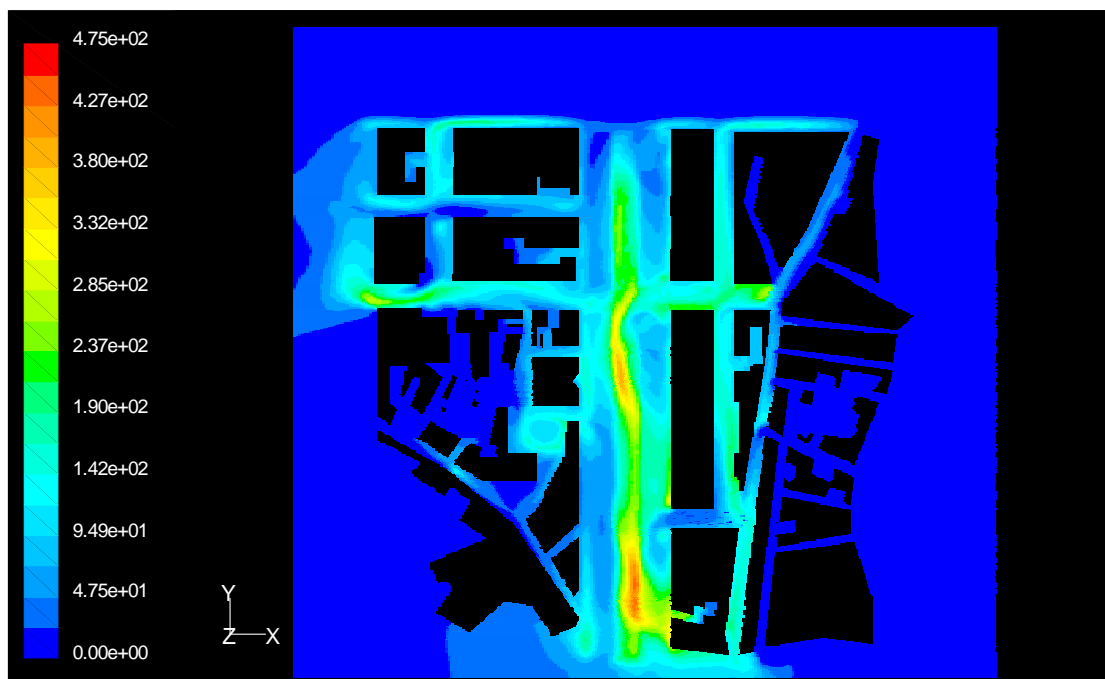


Figura C-6 – Campo horizontal (de altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 3 às 4 horas.

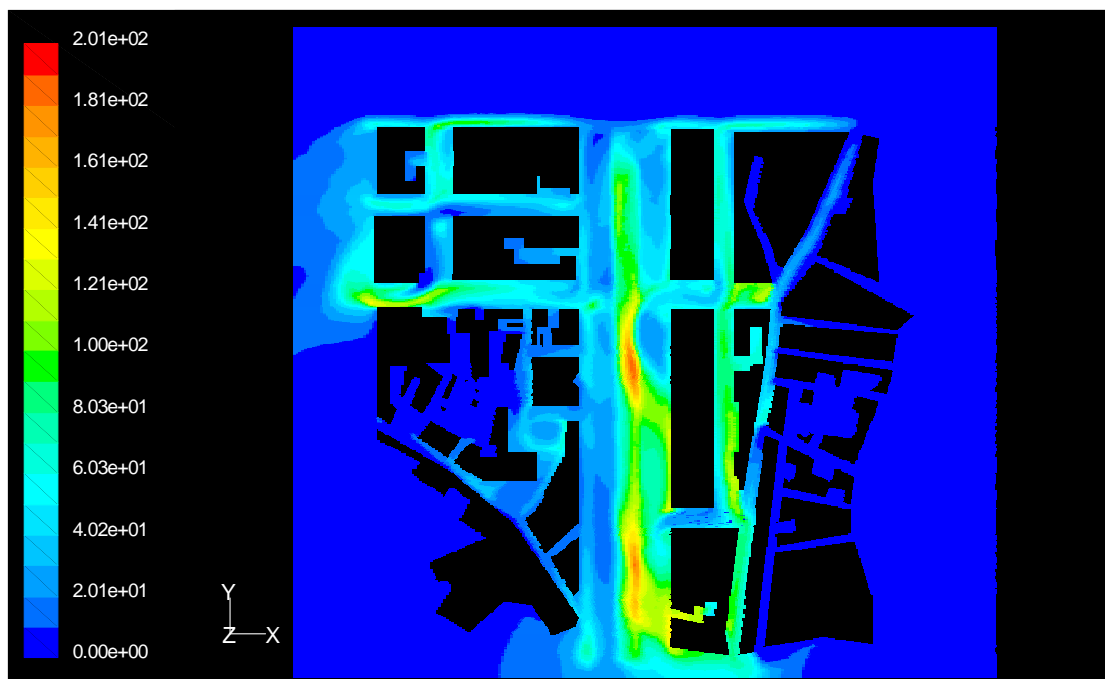


Figura C-7 – Campo horizontal (de altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 4 às 5 horas.

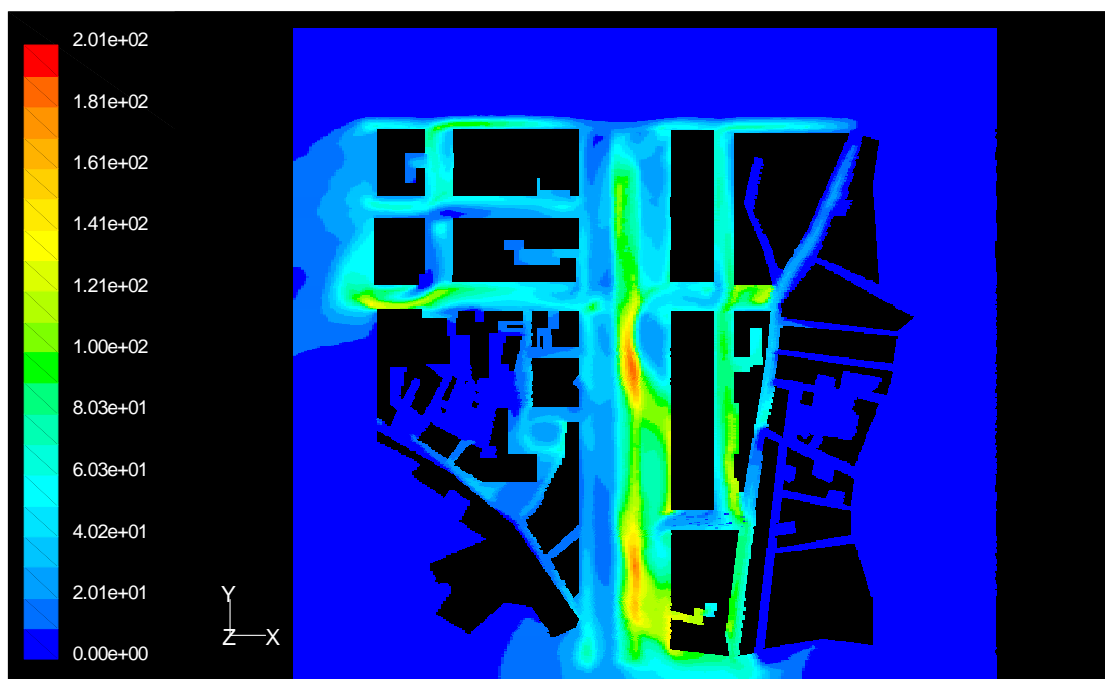


Figura C-8 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 5 às 6 horas.

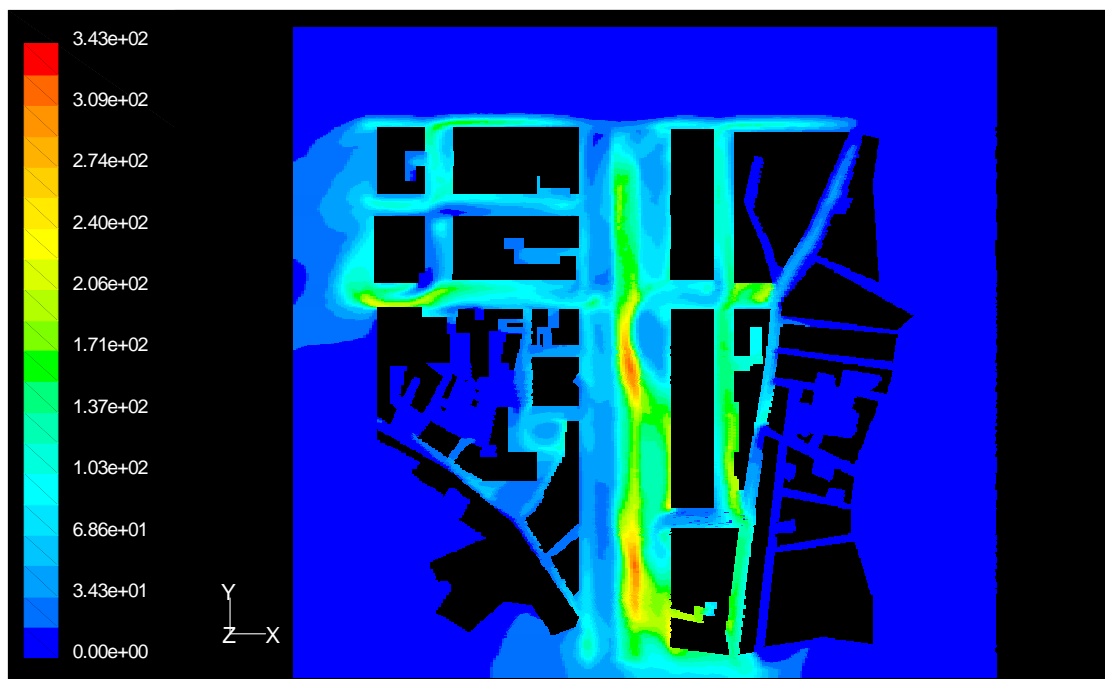


Figura C-9 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 6 às 7 horas.

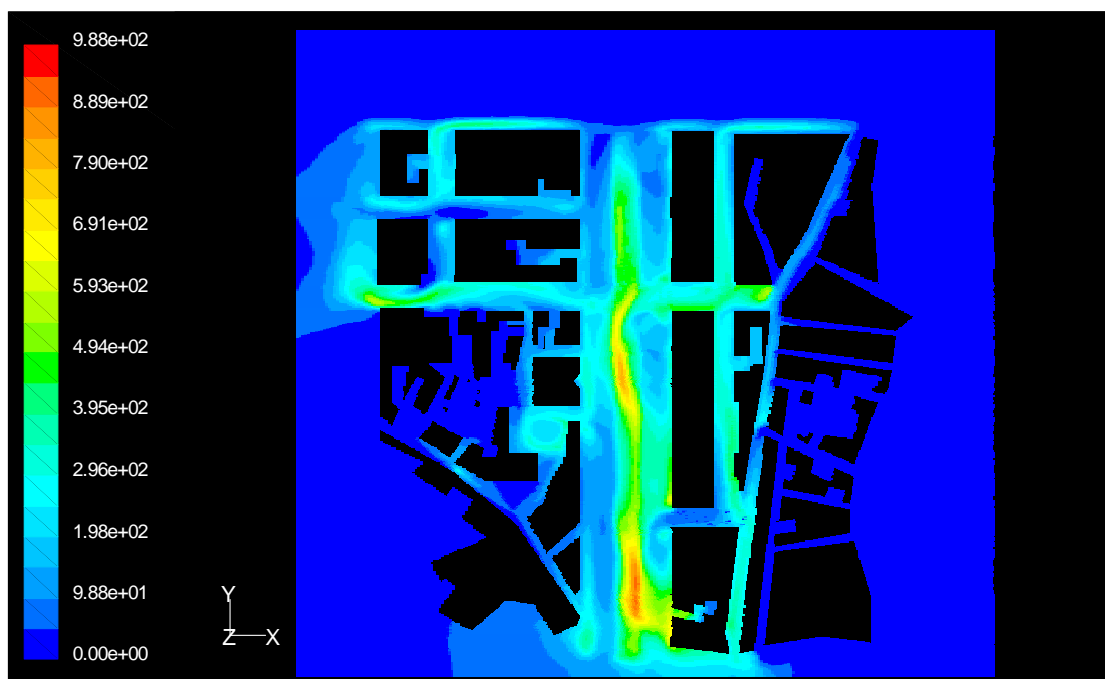


Figura C-10 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 7 às 8 horas.

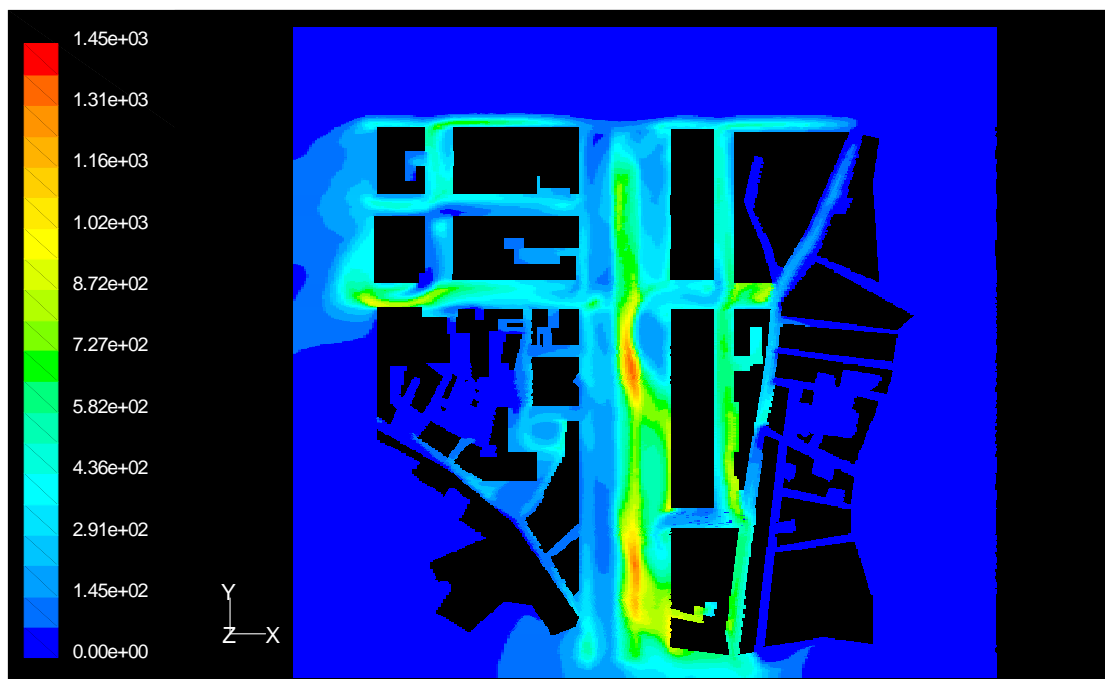


Figura C-11 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 8 às 9 horas.

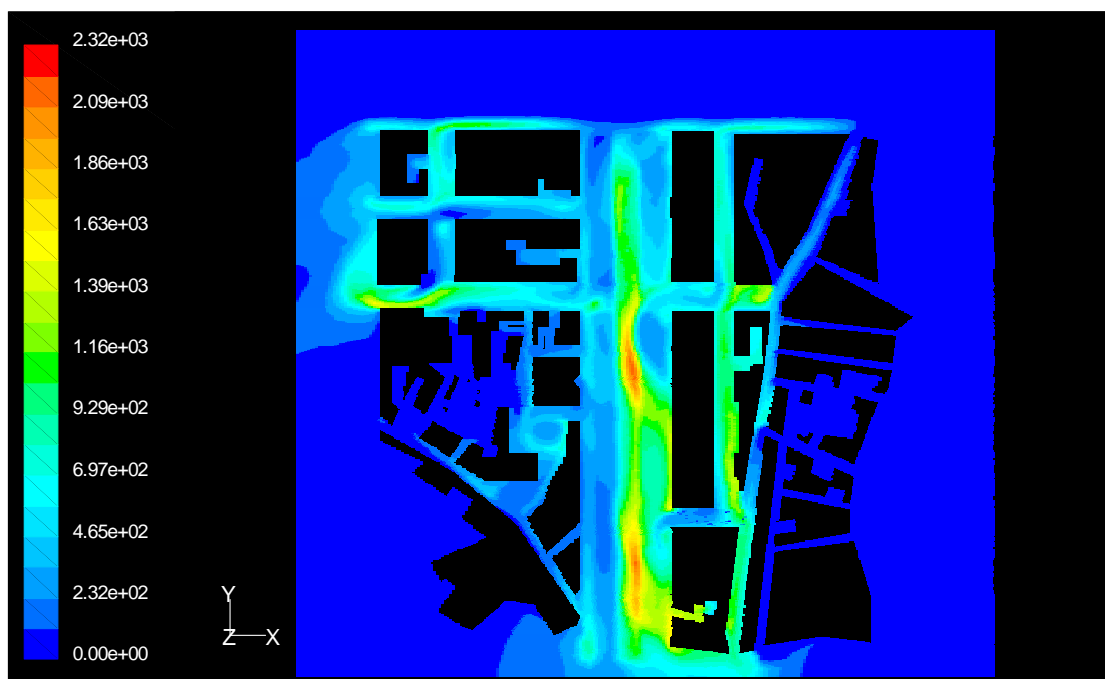


Figura C-12 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 9 às 10 horas.

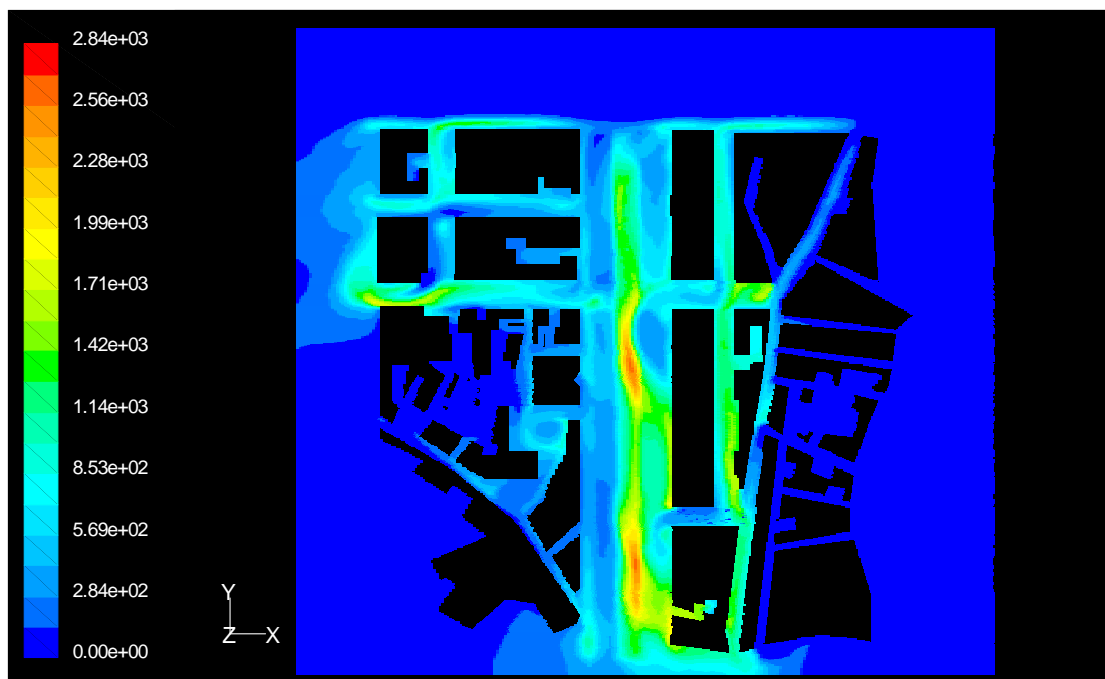


Figura C-13 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 10 às 11 horas.

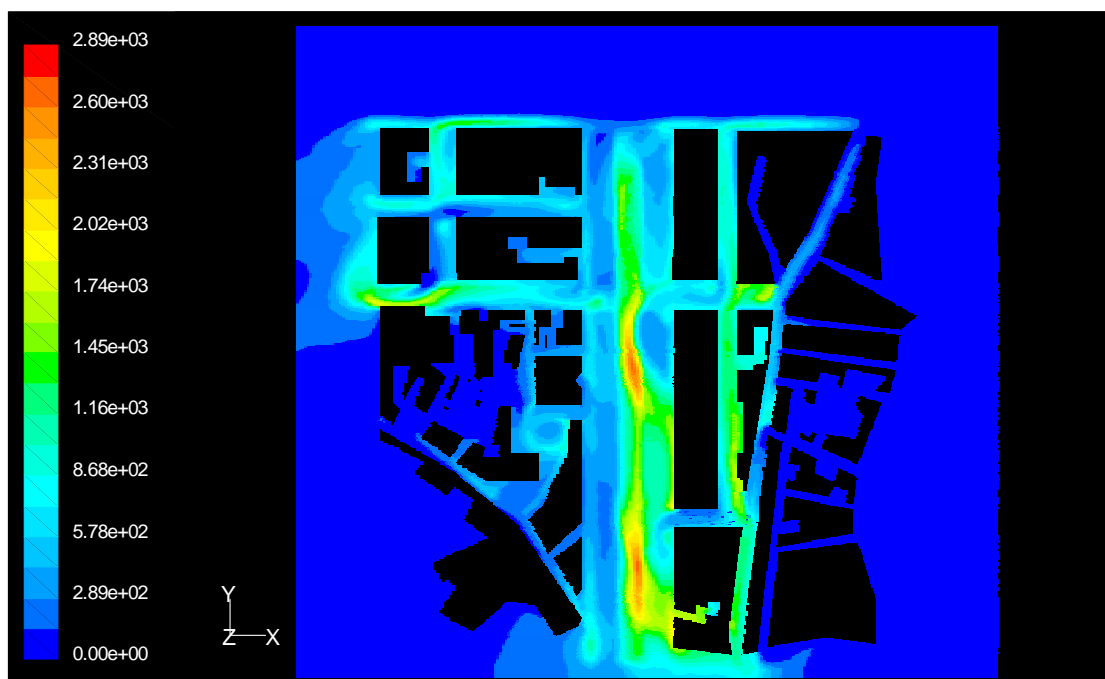


Figura C-14 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 11 às 12 horas.

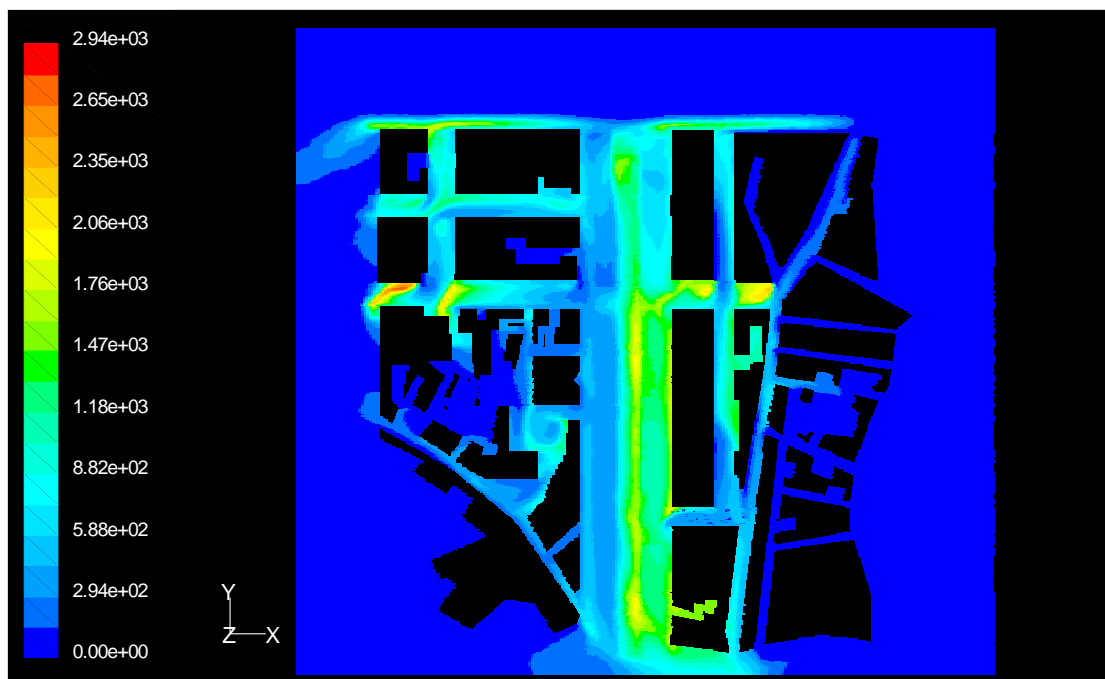


Figura C-15 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 12 às 13 horas.

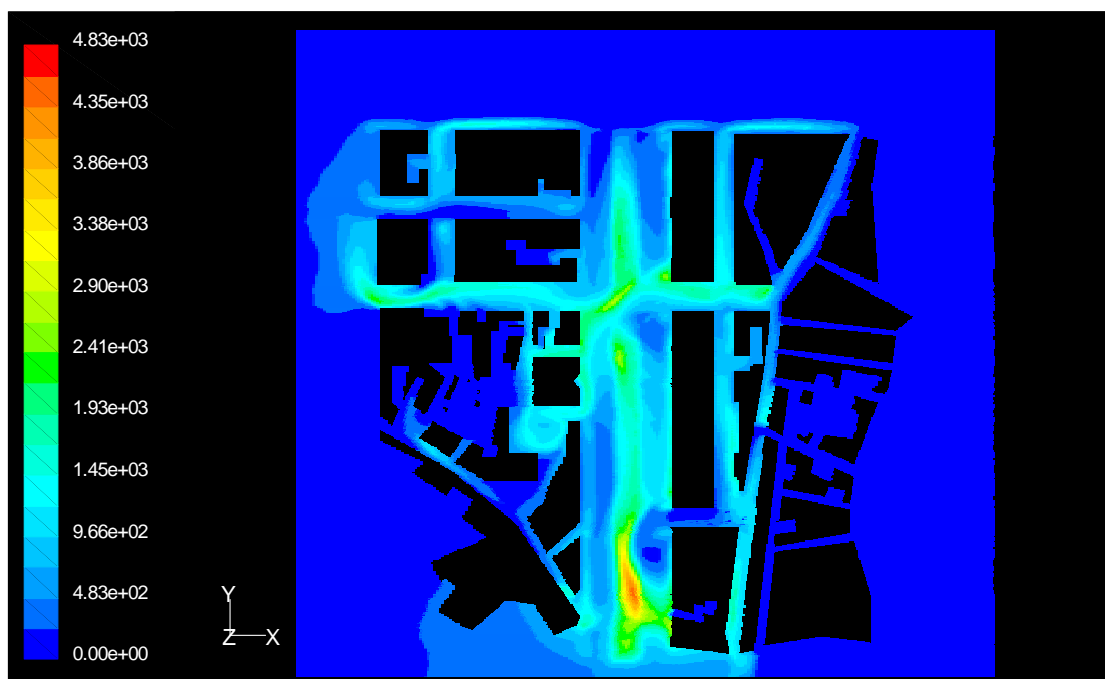


Figura C-16 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 13 às 14 horas.

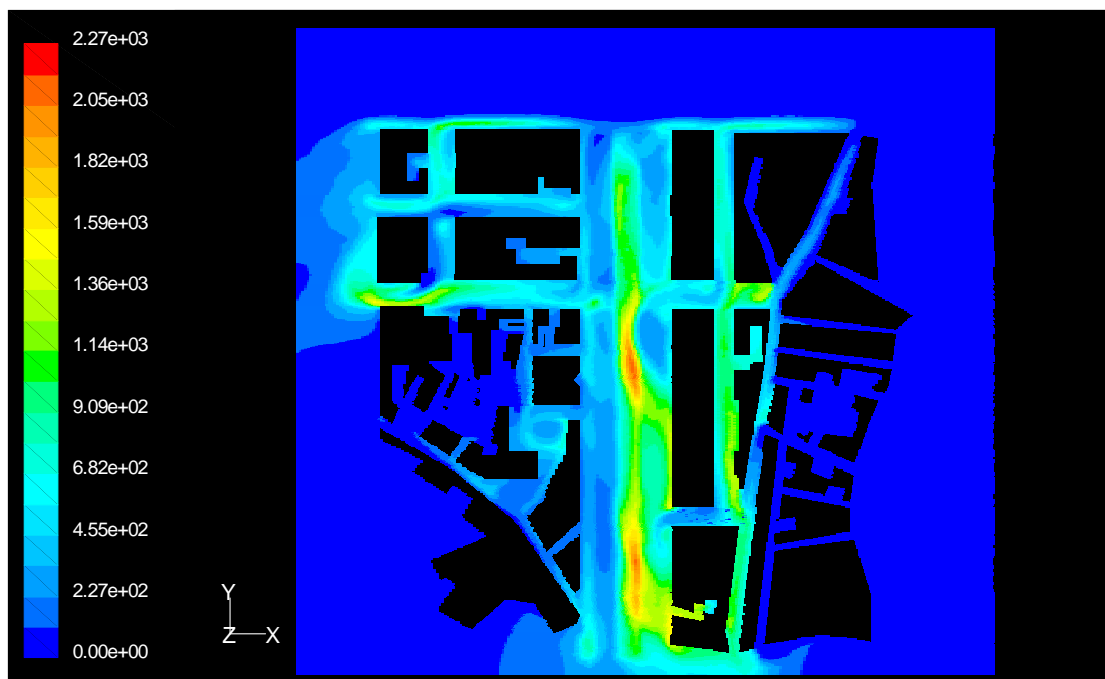


Figura C-17 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 14 às 15 horas.

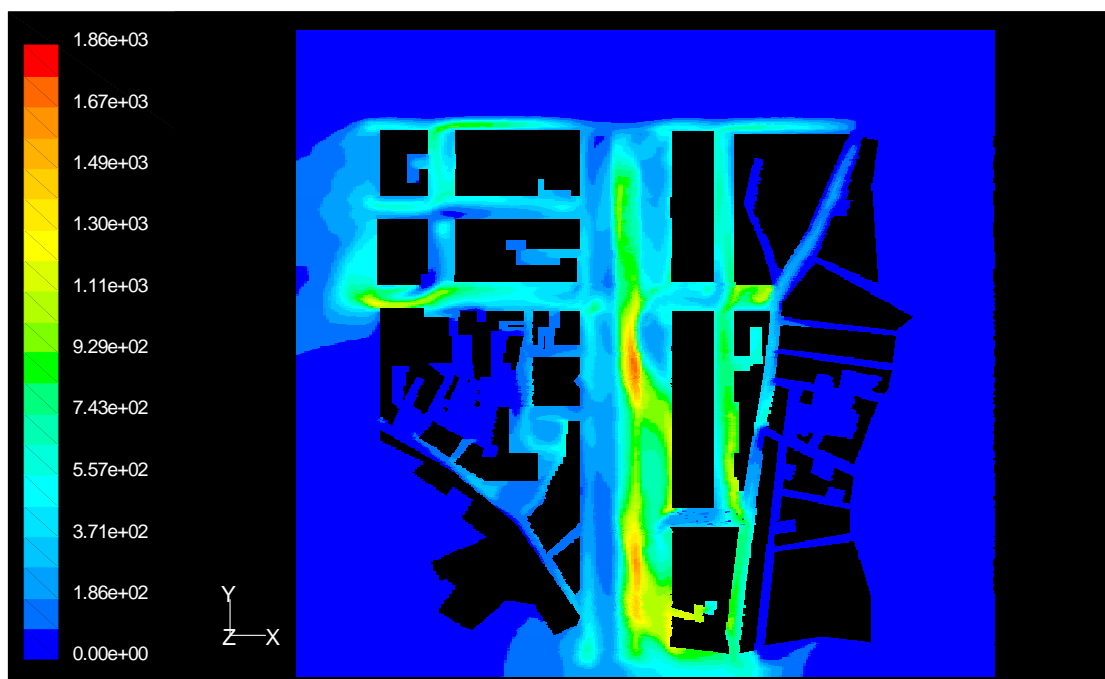


Figura C-18 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 15 às 16 horas.

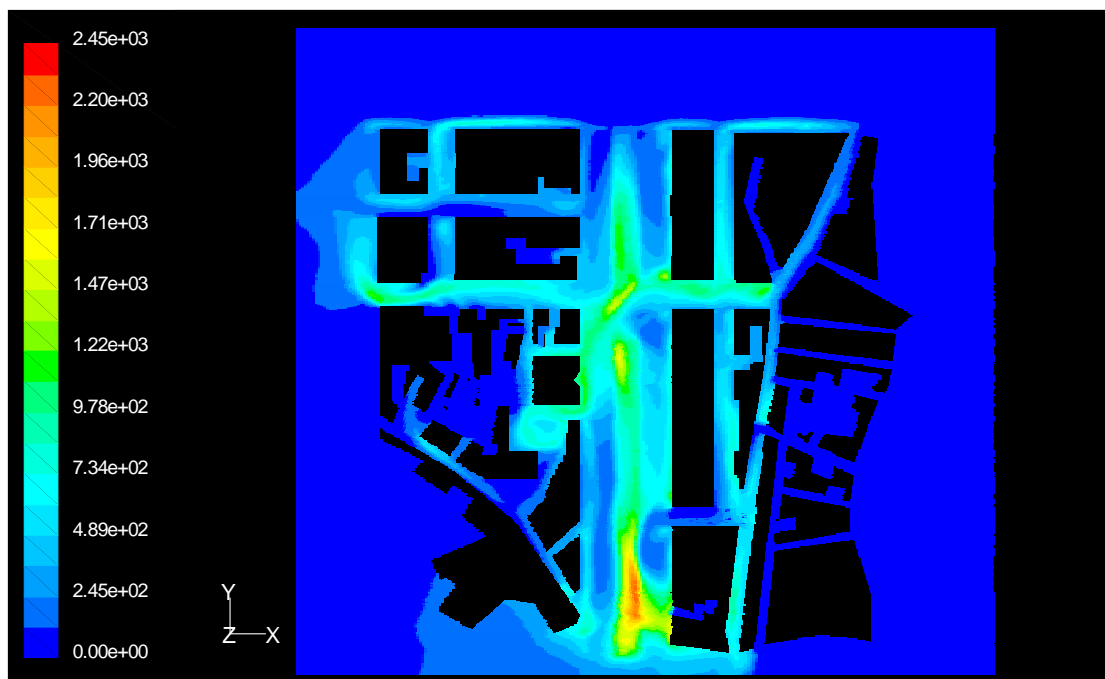


Figura C-19 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 16 às 17 horas.

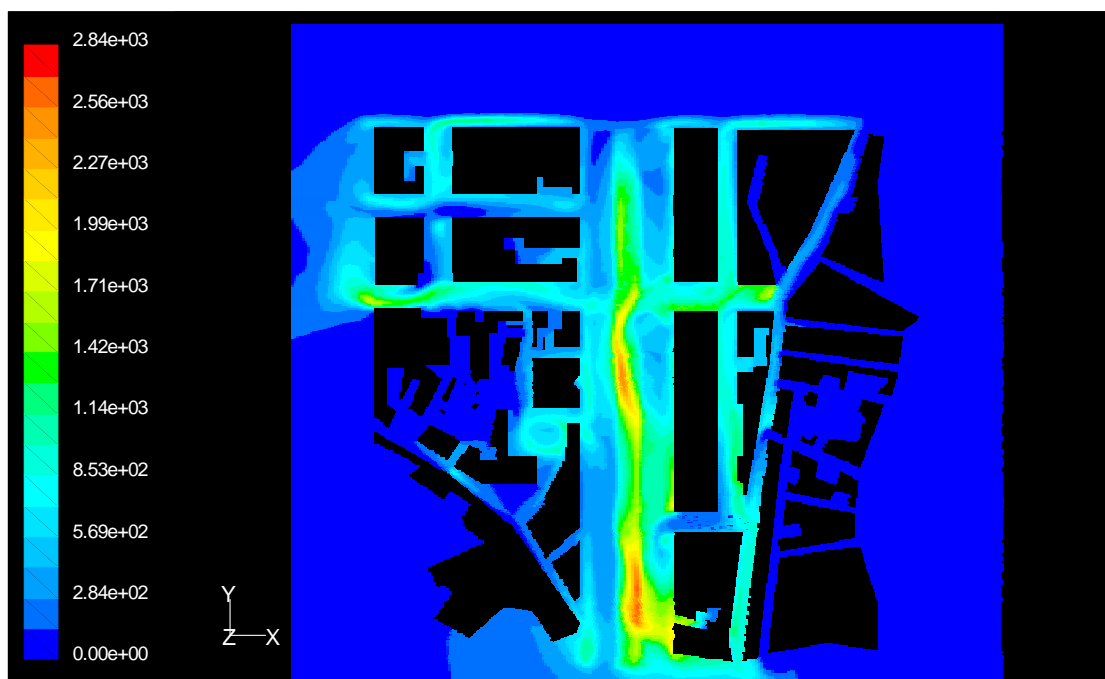


Figura C-20 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 17 às 18 horas.

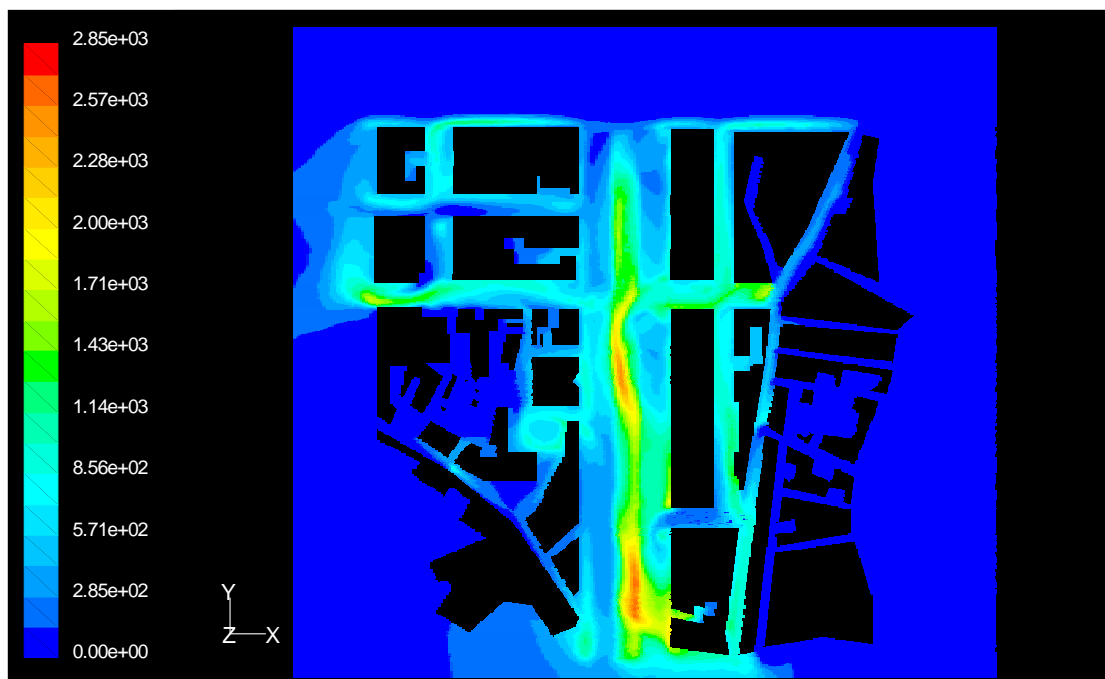


Figura C-21 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 18 às 19 horas.

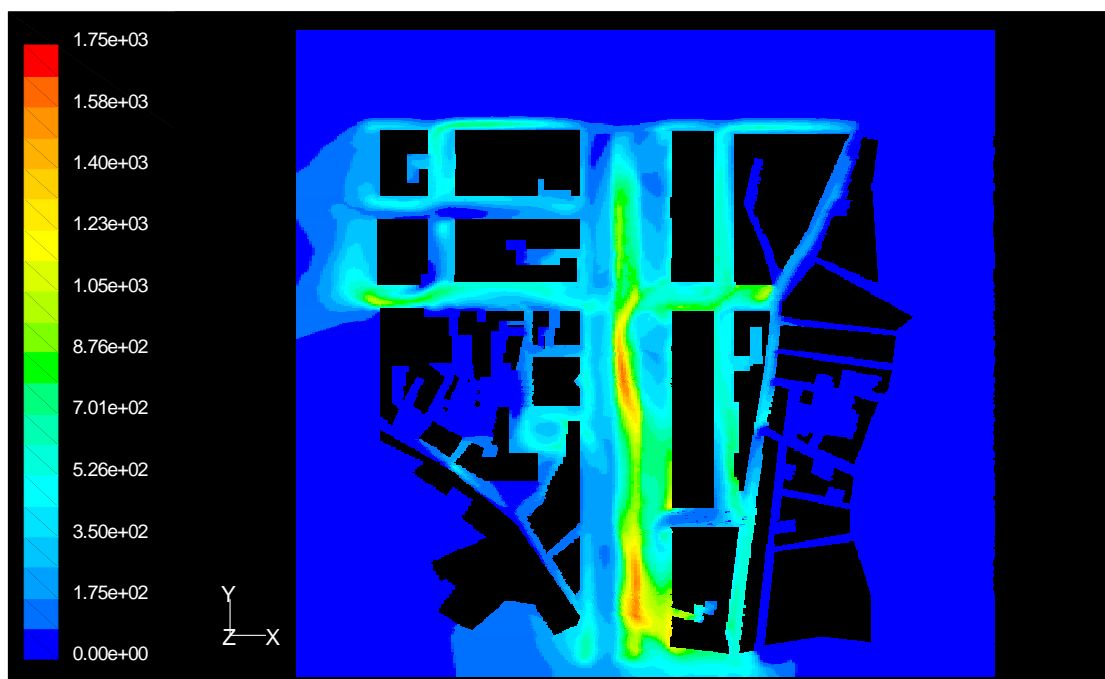


Figura C-22 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 19 às 20 horas.

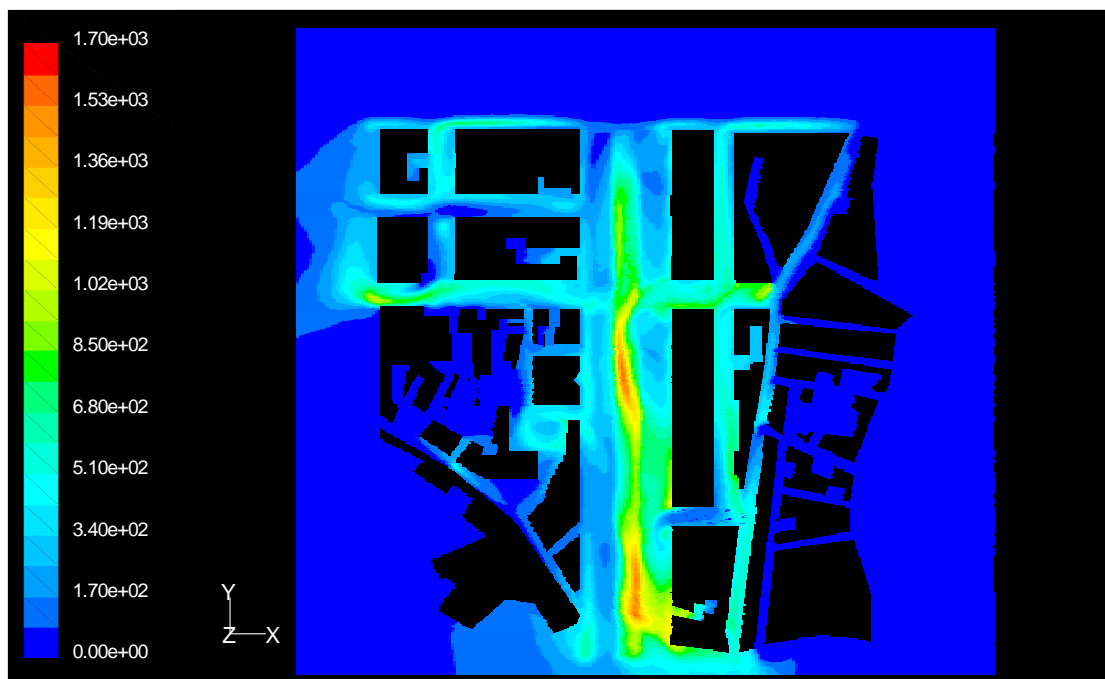


Figura C-23 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 20 às 21 horas.

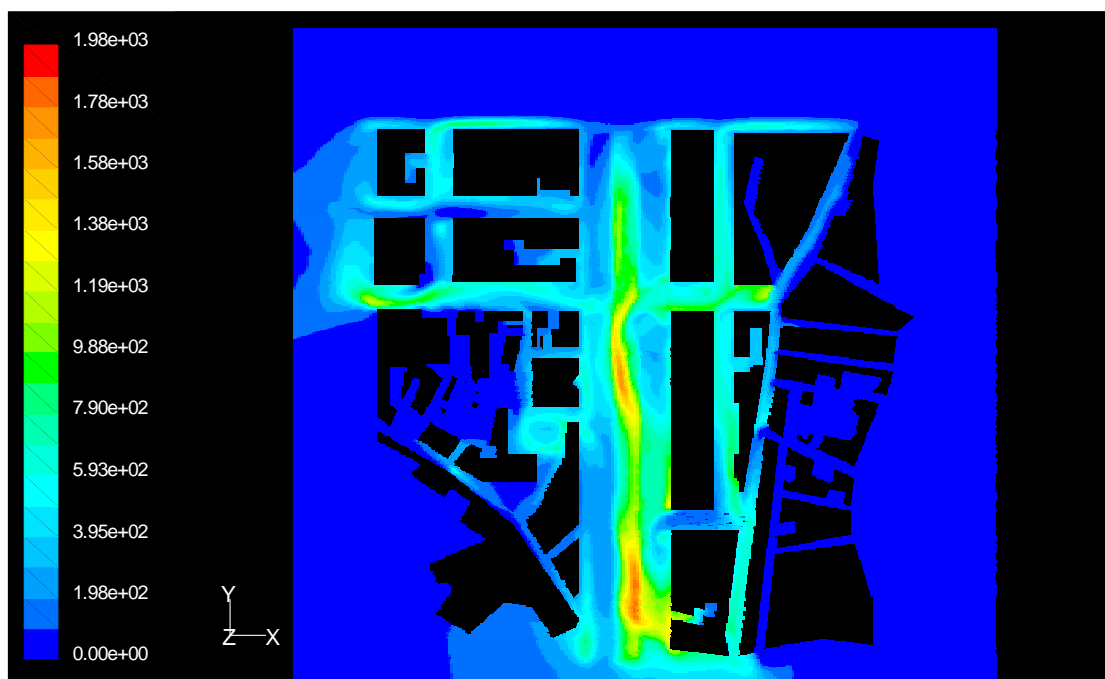


Figura C-24 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 21 às 22 horas.

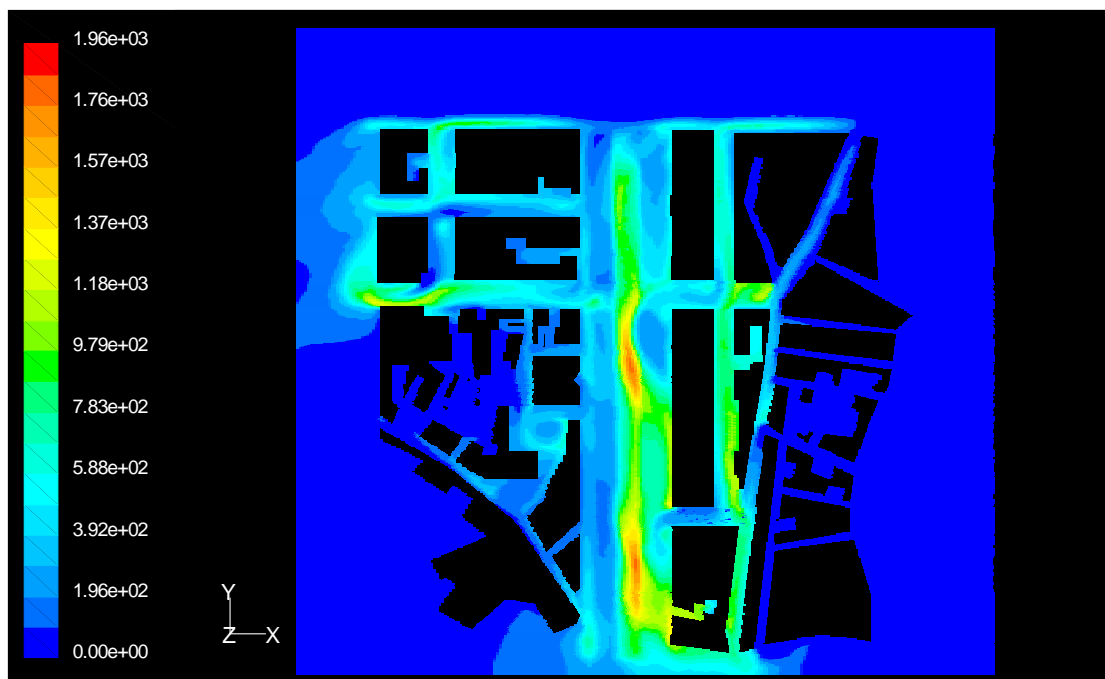


Figura C-25 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 22 às 23 horas.

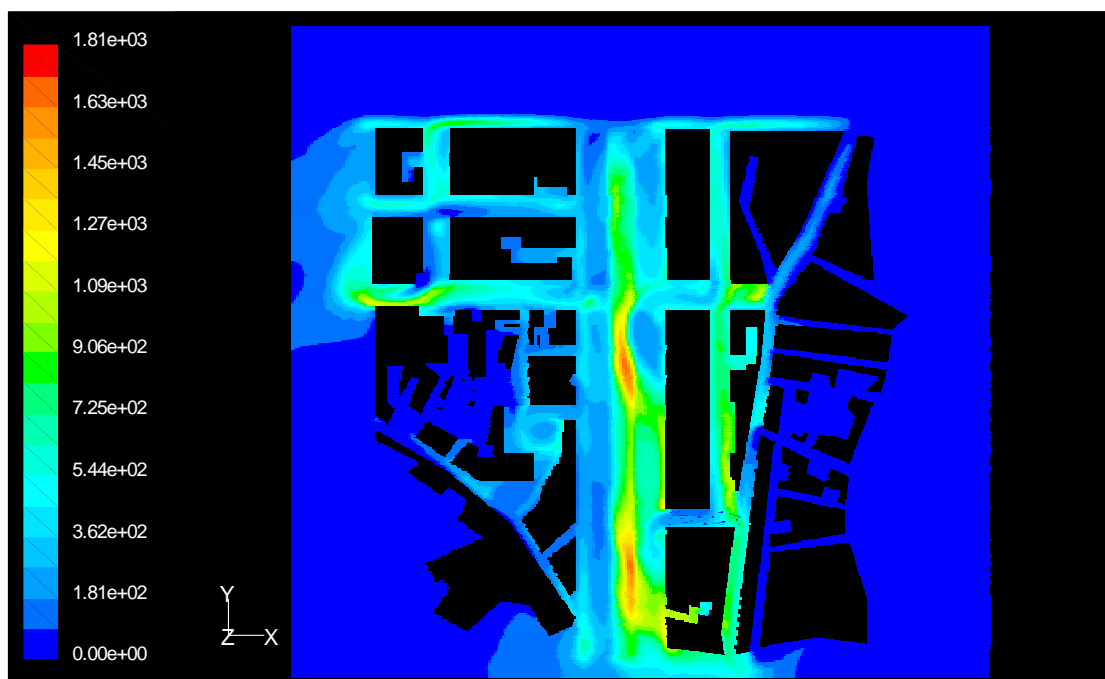


Figura C-26 – Campo horizontal (altura 3 m) de concentrações de CO (em $\mu\text{g.m}^{-3}$), simulado pelo FLUENT para a Avenida da Liberdade, no período das 23 às 24 horas.

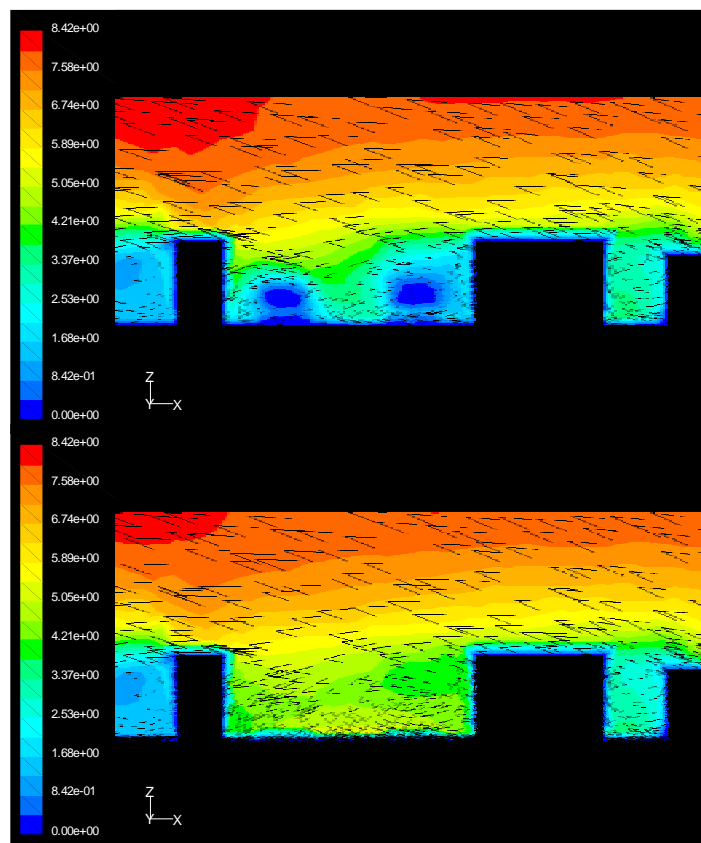


Figura C-27 – Visualização da perturbação exercida pela presença das árvores (na imagem superior) sobre o campo vertical de velocidade na Avenida da Liberdade (simulação correspondente ao período das 11 às 12 horas).